tijdschrift van het

nederlands elektronica- en radiogenootschap

deel 58 nr. 2 1993

nederlands elektronica- en radiogenootschap

Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap
Correspondentie-adres: Postbus 39, 2260 AA Leidschendam.
Gironummer 94746 t.n.v. Penningmeester NERG, Leidschendam.

HET GENOOTSCHAP

De vereniging stelt zich ten doel het wetenschappelijk onderzoek op het gebied van de elektronica en de informatietransmissie en -verwerking te bevorderen en de verbreiding en toepassing van de verworven kennis te stimuleren.

Het genootschap is lid van de Convention of National Societies of Electrical Engineers of Western Europe (Eurel).

BESTUUR

LIDMAATSCHAP

Voor lidmaatschap wende men zich via het correspondentie-adres tot de secretaris.

Het lidmaatschap staat open voor academisch gegradueerden en hen, wier kennis of ervaring naar het oordeel van het bestuur een vruchtbaar lidmaatschap mogelijk maakt. De contributie bedraagt *f* 60,– per jaar.

Studenten aan universiteiten en hogescholen komen bij gevorderde studie in aanmerking voor een junior-lidmaatschap, waarbij 50% reductie wordt verleend op de contributie. Op aanvraag kan deze reductie ook aan anderen worden verleend.

HET TIJDSCHRIFT

Het tijdschrift verschijnt zesmaal per jaar. Opgenomen worden artikelen op het gebied van de elektronica en van de telecommunicatie.

Auteurs, die publicatie van hun onderzoek in het tijdschrift overwegen, wordt verzocht vroegtijdig contact op te nemen met de voorzitter of een lid van de redactiecommissie.

De abonnementsprijs van het tijdschrift bedraagt *f* 60,–. Aan leden wordt het tijdschrift kosteloos toegestuurd.

Tarieven en verdere inlichtingen over advertenties worden op aanvrage verstrekt door de voorzitter van de redactiecommissie.

REDACTIECOMMISSIE

ONDERWIJSCOMMISSIE

ISSN 03743853

MAGNETIC RESONANCE IMAGING

J. Doornbos, PhD
Department of Diagnostic Radiology, P.O. Box 9600, 2300 RC Leiden, The Netherlands

Summary
Magnetic resonance imaging is the name of a medical diagnostic imaging method. The method is based on 'magnetic resonance', a property of certain atomic nuclei. Oscillating magnetic fields may interact with these nuclei which then become excited. Subsequently, the magnetic spins induce an electric signal in a receiver antenna. The received signals are stored in a computer and can be processed to an image displaying the spatial distribution of the nuclear spins.

Magnetic resonance imaging (MRI) is based on the phenomenon of nuclear magnetic resonance (NMR) which was discovered in the mid 1940's. The nuclei of certain atoms, e.g. the hydrogen nuclei (protons), have a so called magnetic moment and a magnetic spin state. When placed in a magnetic field, this spin state will occupy one of two possible magnetic states: the high or the low energy level state. When the nucleus is exposed to a radiofrequency (RF) field of a certain frequency, the spin equilibrium is disturbed as the transition of spins into another state is stimulated by the oscillating magnetic component of the RF field. This phenomenon is called 'nuclear magnetic resonance'. Hydrogen atoms – present in water and fat molecules in the body – will exhibit magnetic resonance when exposed to an RF field of 42.6 MHz at a magnetic field strength of 1 Tesla. This resonance frequency is proportional to the magnetic field strength. When RF input ceases, the spins will return to their initial equilibrium distribution, due to so called 'relaxation processes'. During this relaxation the excited spins themselves constitute an oscillating magnetic field and induce an electric (AC) signal in the receiver coil. The frequency characteristics of this AC-signal are directly corresponding with the magnetic field strength experienced by the spins. The time it takes for the spin distribution to return to its initial equilibrium is characterized by the 'nuclear spin relaxation times'.

In the medical application of MRI, which was developed in the late 1970's, the patient is placed in a strong, homogeneous magnetic field. An RF field, transmitted from a coil surrounding the patient, is then used to alter the relative populations of the spin energy states.

The spins in the patient's body are spatially encoded as to enable the later computation of their location. This encoding is established by the use of magnetic field gradients which induce spatial differences in magnetic field strength, and hence in the frequency of the oscillating magnetization of the spins depending on their spatial location. An ensemble of radiosignals from the patient is received by the antenna, stored in a computer memory and processed by Fourier reconstruction to yield images of the selected region of the body. The Fourier reconstruction transforms the information on frequencies to information on spatial locations. By manipulation of the magnetic field any desired tomographic section plane can be visualized.

In diagnostic radiology MRI is applied to display the distribution of proton magnetization within slices of the patient's body. Biological tissues mainly consist of water and fat molecules which are made up of carbon, oxygen and hydrogen atoms. The hydrogen nuclei are used for magnetic resonance. The magnetization at a certain location in the section plane under examination is dependent on the local proton density and the relaxation behaviour of the spins present. Fortunately, it appears that tissues differ strongly in relaxation times and proton density, and these differences are used to bring about image contrast between various organs and disease processes such as tumors, hemorrhage, inflammation, etc.



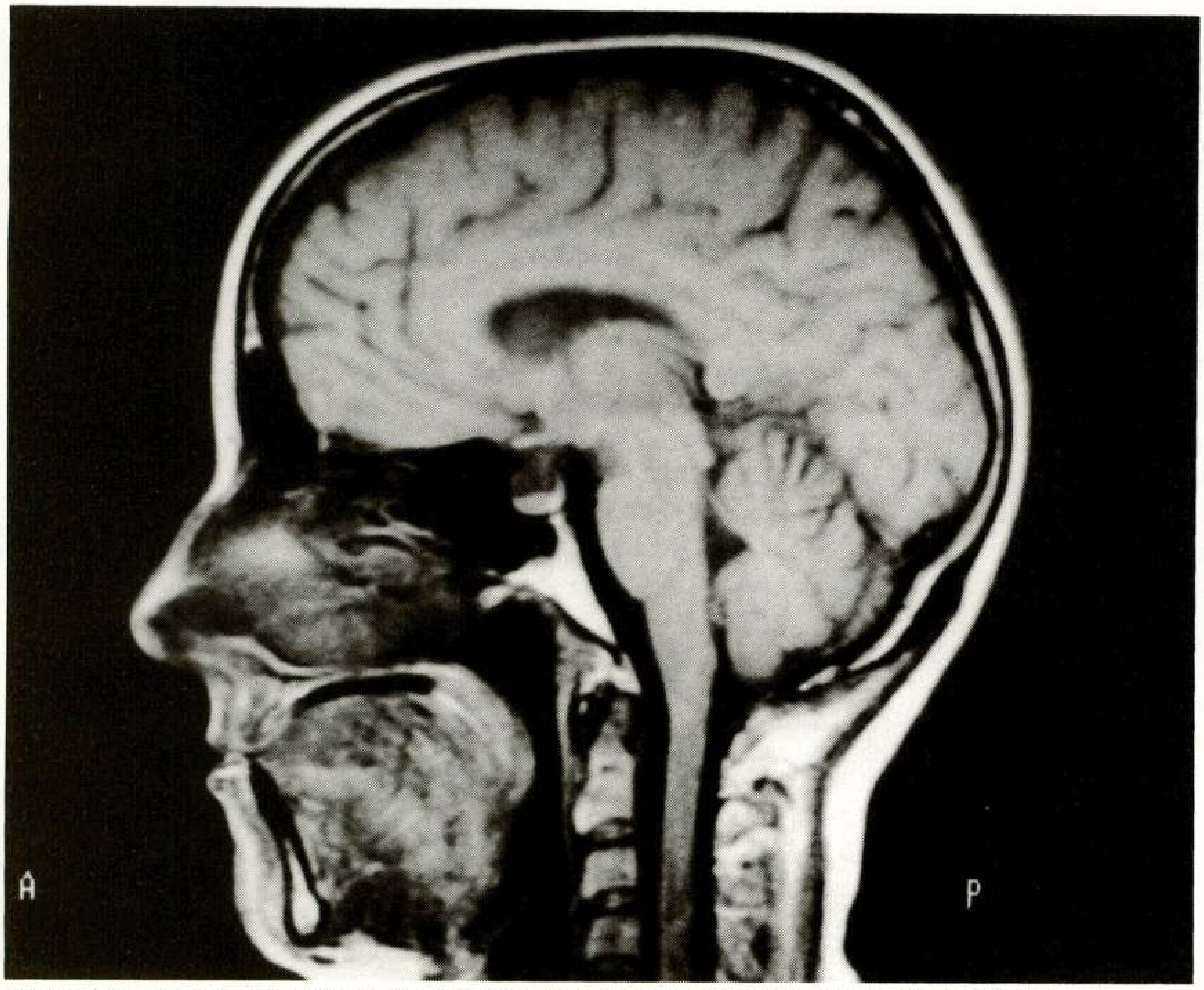
Figuur 1: MRI-scanner (Philips), zoals opgesteld in het Academisch Ziekenhuis Leiden.

In general, the main applications of MRI are in the diagnosis of neurological and musculoskeletal disease. The properties that make MRI a very valuable radiographic technique are:

1. MRI offers high soft tissue contrast in comparison to other radiodiagnostic methods,
2. the imaging planes are freely selectable,
3. bone, soft tissue, and blood vessels are visualized simultaneously,
4. MRI is a non-invasive technique,
5. no ionizing radiation is involved.

Further reading

1. Locher PR. Tomografie met behulp van protonspinresonantie. Philips Technisch Tijdschrift, 41, 83-89, 1983.
2. Lissner J, Seiderer M, ed. Klinische Kernspintomographie. 1st ed. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1987: 1-94, ISBN 3-432-95621-5.
3. Newhouse JN, Wiener JI. Understanding MRI. (1st ed.) Boston: Little, Brown and Company, 1991: ISBN 0-316-60474-7.
4. Oldendorf W, Oldendorf J.W. MRI Primer. (1st ed.) New York: Raven Press, 1991: ISBN 0-88167-769-8.
5. Horowitz AL. MRI Physics for Radiologists, A visual approach. (2nd ed.) New York: Springer-Verlag, 1992: ISBN 0-387-97717-1.



Figuur 2: Lengtedoorsnede door de schedel. De hersenen, het ruggemerg en de halswervels worden duidelijk afgebeeld.

Voordracht gehouden tijdens de 407e werkvergadering.

MAGNETISCHE RESONANTIE ANGIOGRAFIE

Dr. C.J.G. Bakker
Afdeling Radiodiagnostiek, Academisch Ziekenhuis Utrecht

1. Inleiding

Kernspinresonantie-tomografie (magnetic resonance imaging, MRI) heeft zich de afgelopen jaren een belangrijke plaats verworven in de klinische diagnostiek, een positie die zich, naar verwachting, de komende jaren nog verder zal versterken. MRI is non-invasief, maakt geen gebruik van ioniserende straling, geeft een hoog contrast tussen zachte weefsels, biedt de mogelijkheid van willekeurig georiënteerde scanvlakken en is vrij van schadelijke bijwerkingen. Als diagnostische modaliteit is MRI met name succesvol gebleken op het gebied van de hersenen, de wervelkolom, het bewegingsapparaat en de inwendige organen. Een bijzonderheid is dat met MRI ook stroming van lichaamsvloeistoffen zichtbaar gemaakt kan worden, bijv. die van de liquor cerebrospinalis in het ventrikelsysteem en in het centrale kanaal van het ruggemerg, maar ook van het bloed in het hart, de aders en de slagaders. Men spreekt in dit verband wel van magnetische resonantie angiografie (MRA). Faciliteiten voor MRA zijn tegenwoordig vrijwel standaard op MRI scanners aanwezig en in de literatuur wordt in toenemende mate over de klinische toepassingsmogelijkheden gerapporteerd [1-7].

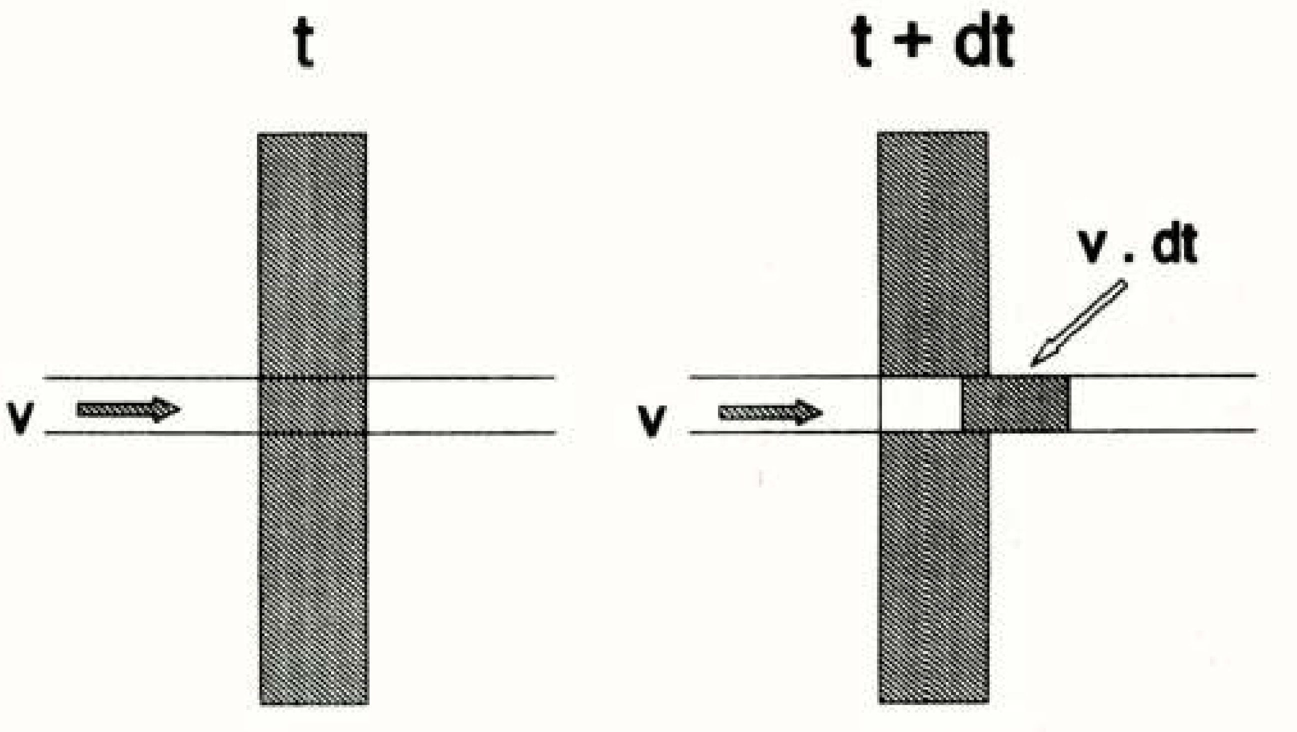
In dit overzichtsartikel gaan wij achtereenvolgens in op de wijze waarop stroming zich in conventionele MRI opnamen manifesteert, op de belangrijkste MRA methoden die thans ter beschikking staan en op de stand van zaken met betrekking tot de klinische toepassing van MRA.

2. Stromingseffecten in MR beelden

In de totstandkoming van een MRI opname kunnen verschillende stappen worden onderscheiden. Om te beginnen worden de waterstofprotonen in de af te beelden plak met behulp van een zendspoel geëxciteerd. Vervolgens worden deze protonen met behulp van een plaatsafhankelijk magneetveld, het zg. gradiëntveld, gecodeerd, waarna de aldus gecodeerde signalen met een detectiespoel worden opgevangen en gedecodeerd. Na een zekere wachttijd, nodig voor het evenwichtsherstel van de protonen in de plak, wordt deze cyclus herhaald met een gewijzigde codering. Uit een serie verschillend gecodeerde metingen laat zich tenslotte een MR beeld van de plak reconstrueren.

Het contrast in een MR afbeelding wordt bepaald door de protonenconcentratie (lees: watergehalte) en de relaxatieparameters T1 en T2 van de afgebeelde weefsels en door de timing van het experiment. Zo zal een korte wachttijd tussen opeenvolgende excitaties aanleiding geven tot relatief zwakke signalen voor weefsels met een relatief lange relaxatietijd T1. De herstelperiode is voor deze weefsels te kort, waardoor verzadiging optreedt en een verzwakt signaal wordt afgegeven. Voorgaande analyse van het contrast in MRI is strikt genomen alleen geldig voor stationaire weefsels en gaat niet op voor stromend bloed. Door stroming wordt namelijk zowel de plaatscodering van de protonen beïnvloed als de signaalsterkte. Grotere bloedvaten (> 0.5 mm) manifesteren zich in een MR afbeelding dan ook door een grillige signaal en door met stroming gepaard gaande artefacten. Verschillende fysiologische en opnametechnische factoren blijken van invloed op de wijze waarop stromend bloed zich presenteert. Deze factoren hebben in het algemeen betrekking op zowel de amplitude als de fase van het gedetecteerde signaal.

Amplitude-effecten, ook wel time-of-flight (TOF) effecten genoemd, ontstaan o.a. doordat excitatie en detectie in MR imaging niet gelijktijdig plaatsvinden en doordat bewegende protonen zich eerder dan stationaire spins aan verzadiging door een reeks excitatiepulsen onttrekken. Kruist een bloedvat bijvoorbeeld een af te beelden plak (figuur 1), dan zal het bloed



Figuur 1: Diagram ter verklaring van het effect van stroming op het MR signaal van bloed. De verticale balken geven de opnameplak aan, de horizontale een bloedvat. Uitstroomverliezen treden op als in het interval dt tussen excitatie en detectie een significante fractie van de geëxciteerde protonen het vlak verlaat. Signaalwinst door instroming van onverzadigde protonen treedt op als een vlak met korte tussenpozen dt wordt geëxciteerd, waardoor stationaire weefsels verzadigd raken; v = stroomsnelheid.

dat op tijdstip t geëxciteerd is, zich ten tijde van detectie (t+dt) al weer gedeeltelijk buiten deze plak bevinden en derhalve een verminderd signaal genereren. In de Angelsaksische literatuur worden de op dit uitstroomeffect gebaseerde MRA technieken aangeduid met black blood imaging. Figuur 1 kan ook dienen om een ander effect van stroming duidelijk te maken. Wordt eenzelfde plak met korte tussenpozen, dt, geëxciteerd, dan zal een zekere verzadiging van stationaire weefsels optreden. Bloed onttrekt zich hieraan door continue verversing en zal daarom op grond van dit mechanisme een relatief sterk signaal genereren. In de Angelsaksische literatuur spreekt men van flow related enhancement en worden de op dit instroomeffect gebaseerde MRA technieken aangeduid met bright blood imaging.

Fase-effecten ontstaan als protonen zich in een plaatsafhankelijk magneetveld verplaatsen. In het eenvoudigste geval van eenparige beweging, bijvoorbeeld, ondergaan bewegende protonen in een zeker tijdsinterval een fasedraaiing ten opzichte van stationaire protonen die evenredig is met hun snelheid en de duur van het interval. Met behulp van fasegevoelige detectietechnieken kan deze faseverschuiving worden gemeten en kan de snelheid worden berekend. In de praktijk wordt de interpretatie van dergelijke metingen bemoeilijkt doordat de protonen zich met verschillende snelheden binnen een af te beelden volume-elementje verplaatsen, hetgeen aanleiding geeft tot defasering en signaalverlies.

3. MRA methoden

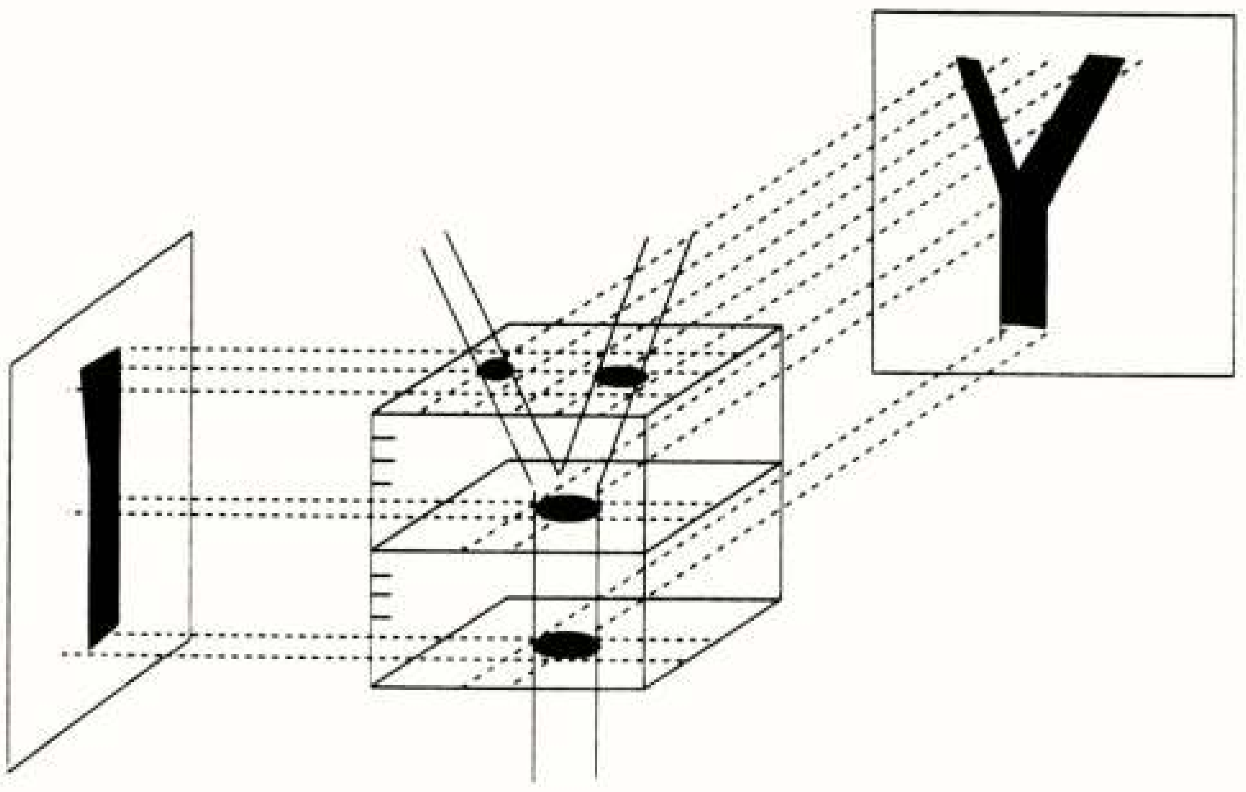
Beperken we ons tot de MRA methoden die de afgelopen jaren op commerciële MR systemen zijn geïmplementeerd, dan kan onderscheid worden gemaakt tussen time-of-flight methoden (TOF-angiografie), waarin de instroming van onverzadigd bloed in de af te beelden plak of het af te beelden volume wordt gedetecteerd, en fasecontrast technieken (PC-angiografie), waarin met behulp van een plaatsafhankelijk magneetveld een snelheidsafhankelijke faseverschuiving tussen stationaire weefsels en stromend bloed wordt gecreëerd. Van beide methoden zijn twee- en driedimensionale varianten beschreven en toegepast.

Bij de 2D variant van de time-of-flight methode wordt met behulp van een gradiënt-echo sequentie, een standaardmethode voor het maken van MR afbeeldingen, plak voor plak een serie aansluitende coupes van het doelgebied verkregen. Door toepassing van korte repetitietijden zullen stationaire weefsels een sterke verzadiging te zien geven en zich als signaalarm presenteren, terwijl instromend bloed onverzadigd is en een sterk signaal afgeeft. Dit geldt zowel voor arterieel als veneus bloed (fig. 2A). Onderdrukking van het instroomeffect is mogelijk door steeds voorafgaand aan de excitatie van de af te beelden plak stroomopwaarts de magnetisatie met behulp van extra pulsen en gradiëntvelden over een groot gebied te verzadigen. Enkelzijdige toepassing van deze presaturatietechniek kan worden gebruikt om arteriële of veneuze instroomeffecten te elimineren (fig. 2B). De effectiviteit hangt uiteraard af van de locale geometrie van het vaatstelsel, van de timing van het experiment, de gekozen plakdikte, en de snelheidsverdeling en de relaxatie-eigenschappen van het stromende medium. Een weloverwogen keuze van de gebieden die worden gepresatureerd biedt derhalve mogelijkheden om selectieve angiografie te bedrijven en het verzorgingsgebied van vaten te traceren .

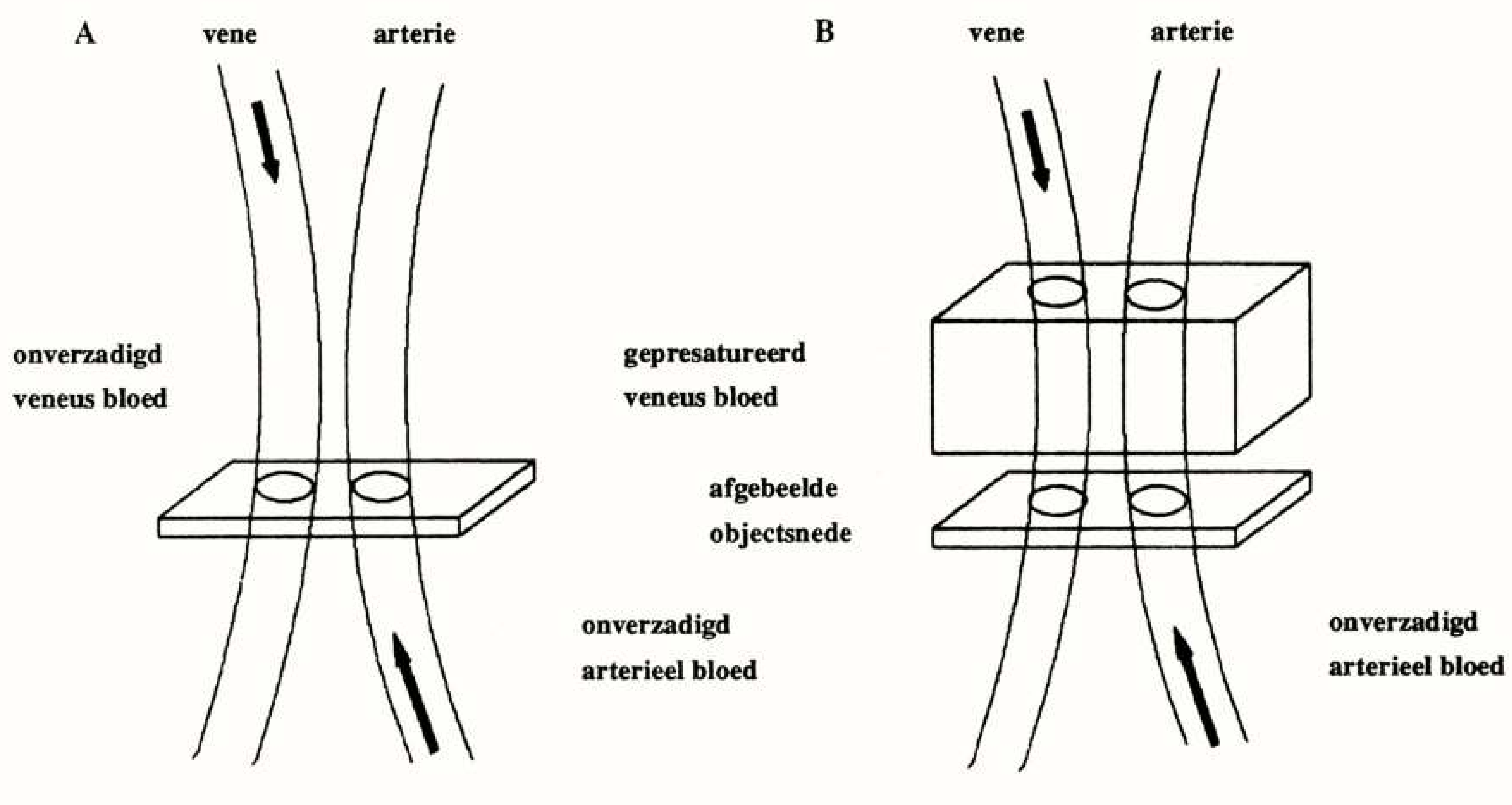
Bij de 3D variant van de TOF techniek wordt een relatief dikke 'slab' van bv. 32 mm geëxciteerd, die met behulp van magnetische codering in dunnere plakken wordt verdeeld. De 3D TOF methode heeft als voordelen boven de 2D techniek een grotere signaalruisverhouding en de mogelijkheid van dunnere plakken en kortere acquisitietijden. Als belangrijkste nadelen gelden de geringere gevoeligheid voor langzame stroming en de relatief grote gevoeligheid voor beweging tijdens de acquisitie (slikken, ademhaling).

2D en 3D TOF angiografie leveren beide een serie evenwijdige plakken van het doelgebied, waarin de bloedvaten de hoogste intensiteit vertegenwoordigen. Met behulp van het maximum-intensity-projection (MIP) algoritme kan uit deze afzonderlijke beelden een serie projectiebeelden worden afgeleid (fig. 3). Weergegeven als videofilm geven deze projecties een ruimtelijke indruk van de afgebeelde vaatstructuur, die de interpretatie kan vergemakkelijken. Om hinderlijke overprojecties te voorkomen kan de bovenbeschreven procedure ook op een willekeurig deelgebied worden toegepast.

Fasecontrast angiografie is een subtractietechniek waarbij de basisbeelden worden verkregen met behulp van een meetcyclus waarvan de stromingsgevoeligheid kan worden gevarieerd zonder dat er voor de stationaire weefsels iets verandert. Afhankelijk van de uitvoering van het experiment geven de resulterende subtractiebeelden informatie over de richting en grootte van verschillende snelheidscomponenten. De methode



Figuur 3: Frontale en laterale maximum-intensity projecties (MIP) van een set time-of-flight angiogrammen van een vaatboom.



Figuur 2: Principe van de 2D time-of-flight angiografie. Het af te beelden vlak wordt met korte tussenpozen geëxciteerd, waardoor de stationaire weefsels verzadigd raken en een zwak signaal geven. Het instromende arteriële en veneuze bloed onttrekt zich aan deze verzadiging en genereert een relatief sterk signaal (a); door toepassing van veneuze presaturatie wordt een arteriogram verkregen (b).

is gevoeliger voor langzame stroming dan TOF, maar is tijdrovender en bewerkelijker en stelt hogere eisen aan de apparatuur.

4. Toepassingen

Het aantal studies waarin de waarde van MRA voor goedgedefinieerde patiëntenpopulaties wordt vergeleken met die van conventionele technieken is tot op heden nog zeer beperkt. Het is daarom voorbarig nu reeds conclusies te trekken omtrent de klinische toepasbaarheid, temeer daar MRA ook op het technische vlak nog volop in ontwikkeling is (snellere scantechnieken, speciale detectiespoelen etc.).

De meeste aandacht is tot nog toe uitgegaan naar het onderzoek van de intra- en extracraniële circulatie en dit zijn dan ook de terreinen waarop een zekere mate van consensus is ontstaan met betrekking tot de optimale techniek.

In MRA studies van de intracraniële vaten wordt, vanwege de hoge eisen die aan het oplossend vermogen worden gesteld, meestal gebruik gemaakt van 3D technieken. Een voorbeeld hiervan geeft figuur 4a, een axiaal projectiebeeld van een 3D TOF opname van het brein ter hoogte van de cirkel van Willis, scantijd 7 min. Vergelijking van de figuren 4a en 4b, respectievelijk verkregen met de 3D en de 2D methode, leert dat de winst in resolutie betaald moet worden met een verlies in gevoeligheid. Toepassingen van intracraniële MRA die in de literatuur worden beschreven zijn o.m. het aantonen en na behandeling vervolgen van aneurysmata, arterioveneuze malformaties, atherosclerotische plaques en tumoren. Meestal gaat het hier om zg. preliminaire studies en ontbreekt een goed vergelijkend onderzoek met conventionele angiografie.

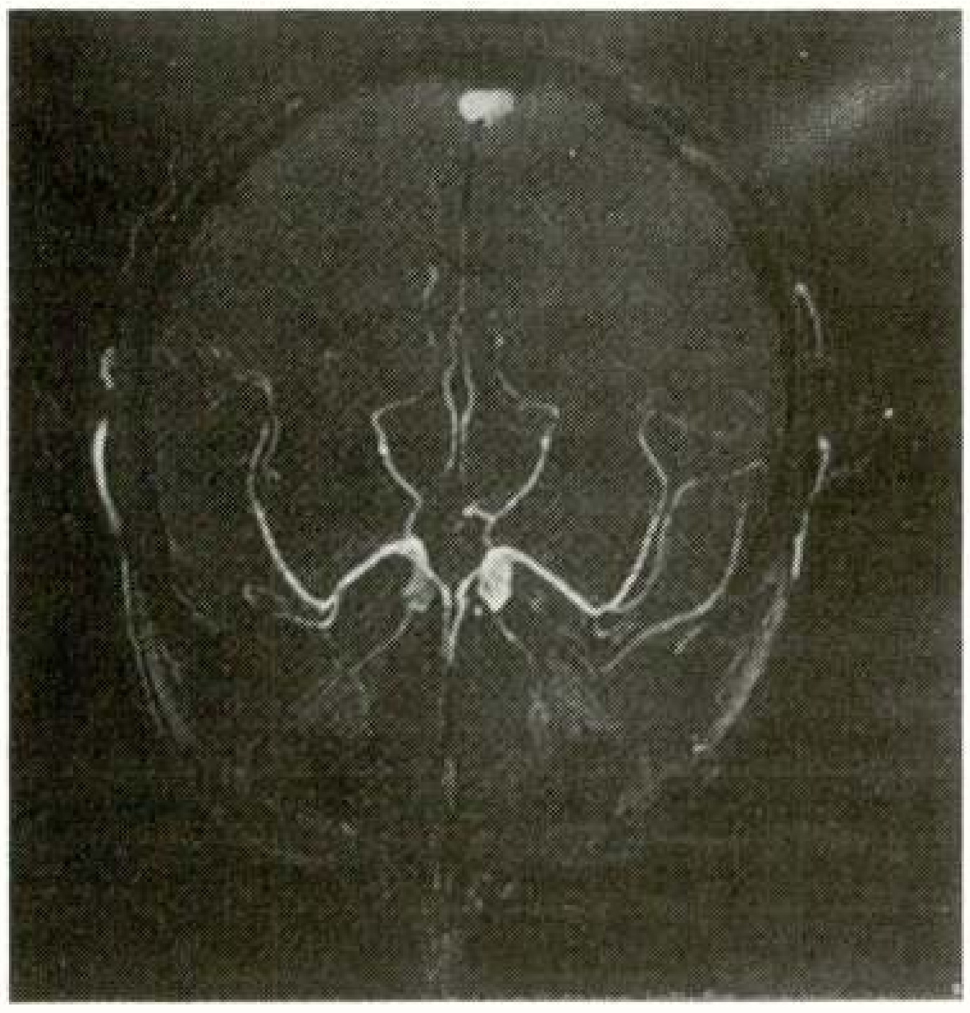
Onderzoek van de halsvaten vindt meestal plaats met de 2D TOF methode. Figuren 5a t/m 5d geven een voorbeeld van een MRA studie van de carotis. Figuur 5a is een sagittale overzichtsopname van het te onderzoeken gebied. Figuur 5b toont een van de 64 transversale 2D TOF opnamen van de halsvaten. Arteriën en venen presenteren zich in deze opnamen als hyperintens door het instroomeffect. Figuur 5c toont dezelfde plak, maar nu met veneuze presaturatie, waardoor een arteriogram verkregen wordt. De figuur 5d toont een laterale projectie van de 64 oorspronkelijke beelden uit deze studie voor de rechter carotisbifurcatie.

Een hardnekkig probleem bij MRA wordt gevormd door de met turbulentie en complexe stroming samenhangende signaalverliezen die abusievelijk als stenosering kunnen worden geduid of tot een overschatting van de stenoseringsgraad leiden. Bekend is het signaalverlies in de bulbus caroticus, dat ook in gezonde proefpersonen wordt waargenomen. Een illustratie van deze problematiek wordt gegeven door figuur 6, waarin het conventionele angiogram van een patiënt met een stenose van de carotis interna (fig. 6a) wordt vergeleken met het overeenkomstige MRA beeld (fig. 6b). Het zal duidelijk zijn dat gradering van stenosen op grond van dergelijke MRA beelden een hachelijke onderneming is. Een aanzienlijk deel van de researchinspanning op dit terrein is dan ook gericht op het ontwikkelen van methoden om signaalverliezen ten gevolge van complexe stroming te reduceren.

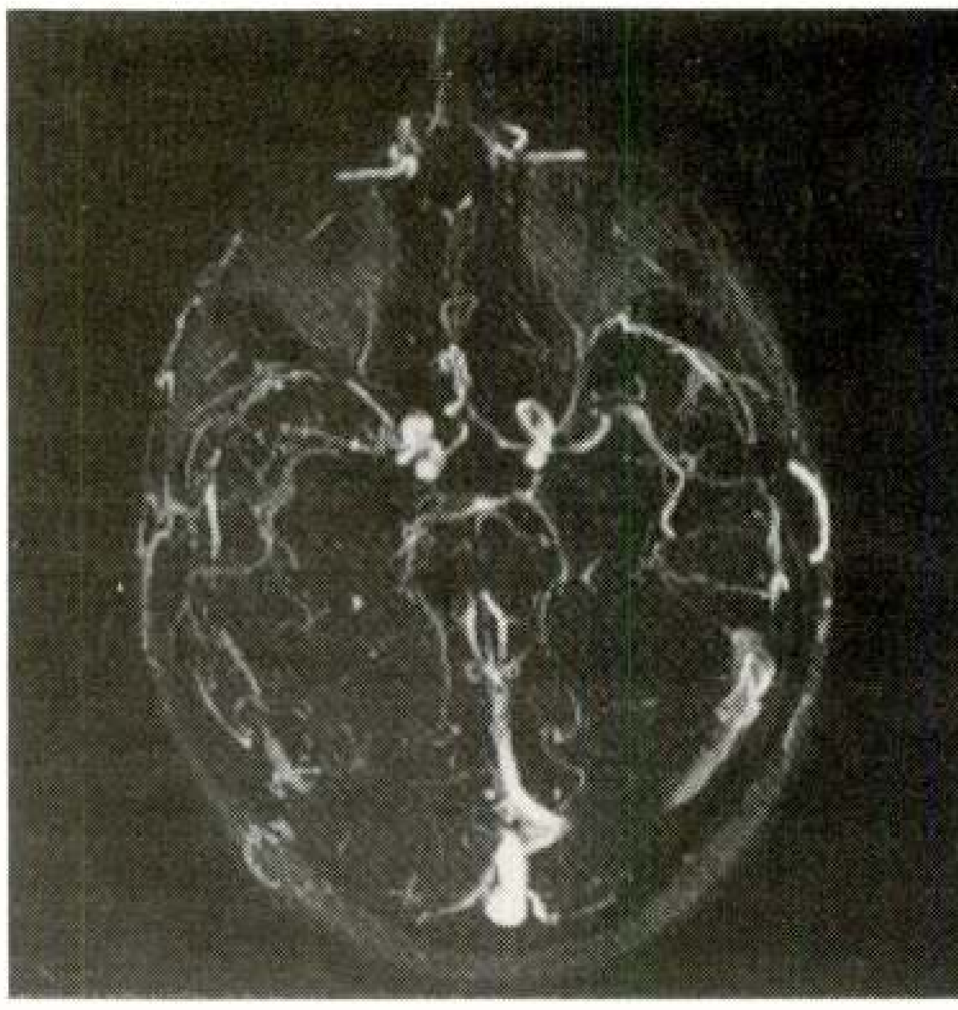
Behalve in de hoofd-halsregio begint MR angiografie, mede door de ontwikkeling van snelle scantechnieken en methoden om bewegingsartefacten te onderdrukken, langzamerhand ook een rol te spelen bij het onderzoek van de aorta (fig. 7a), het portale veneuze systeem en de arteriae renales. Bij het onderzoek van de perifere circulatie (fig. 7b) speelt MRA, vanwege de met de relatief langzame stroming gepaard gaande verzadiging en de excessieve opnameduur bij grote doelvolumina, tot op heden nog nauwelijks een rol van betekenis.

5. Samenvatting en conclusie

Magnetische resonantie angiografie (MRA) is een methode om bloedvaten zichtbaar te maken en stromingsverschijnselen te bestuderen zonder gebruik te maken van ioniserende straling of contrastmiddelen en zonder schadelijke bijwerkingen voor de patiënt. De methode geeft een drie-dimensionaal beeld van de vaatstructuur, is poliklinisch toepasbaar en kan naar believen worden herhaald. Qua resolutie is MRA vooralsnog de mindere van de conventionele angiografie. Bovendien is de methode (nog) behept met enkele hardnekkige artefacten.

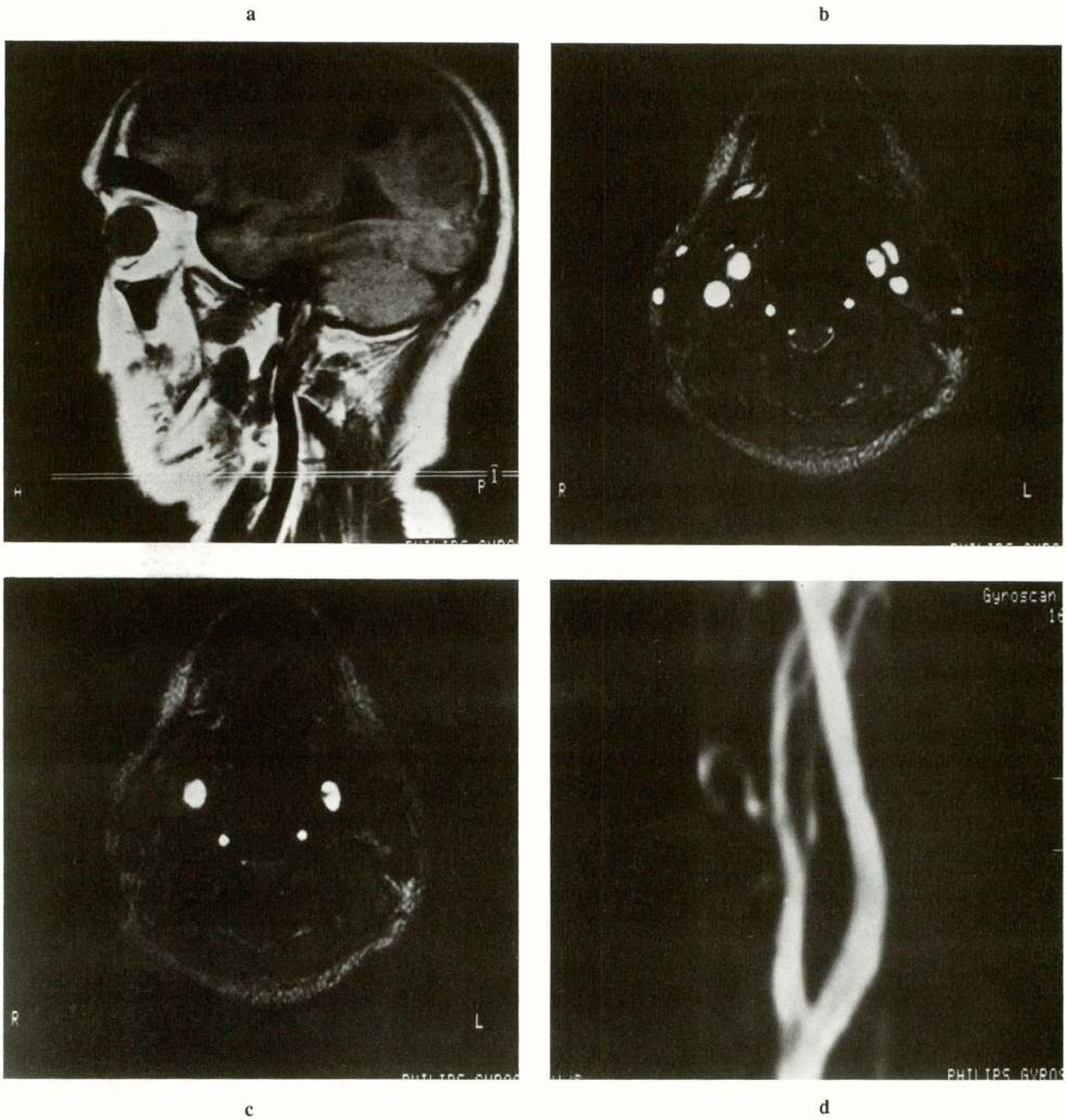


a



b

Figuur 4: Axiale maximum-intensity-projecties van de vaatstructuur ter hoogte van de cirkel van Willis, afgeleid uit respectievelijk een set 3D (a) en een set 2D (b) time-of-flight angiogrammen van dit gebied, scantijd 7 min. Vergelijking van beide figuren leert dat de 2D techniek gevoeliger is voor langzame stroming (venen) en dat met de 3D methode een hoger ruimtelijk oplossend vermogen kan worden verkregen.



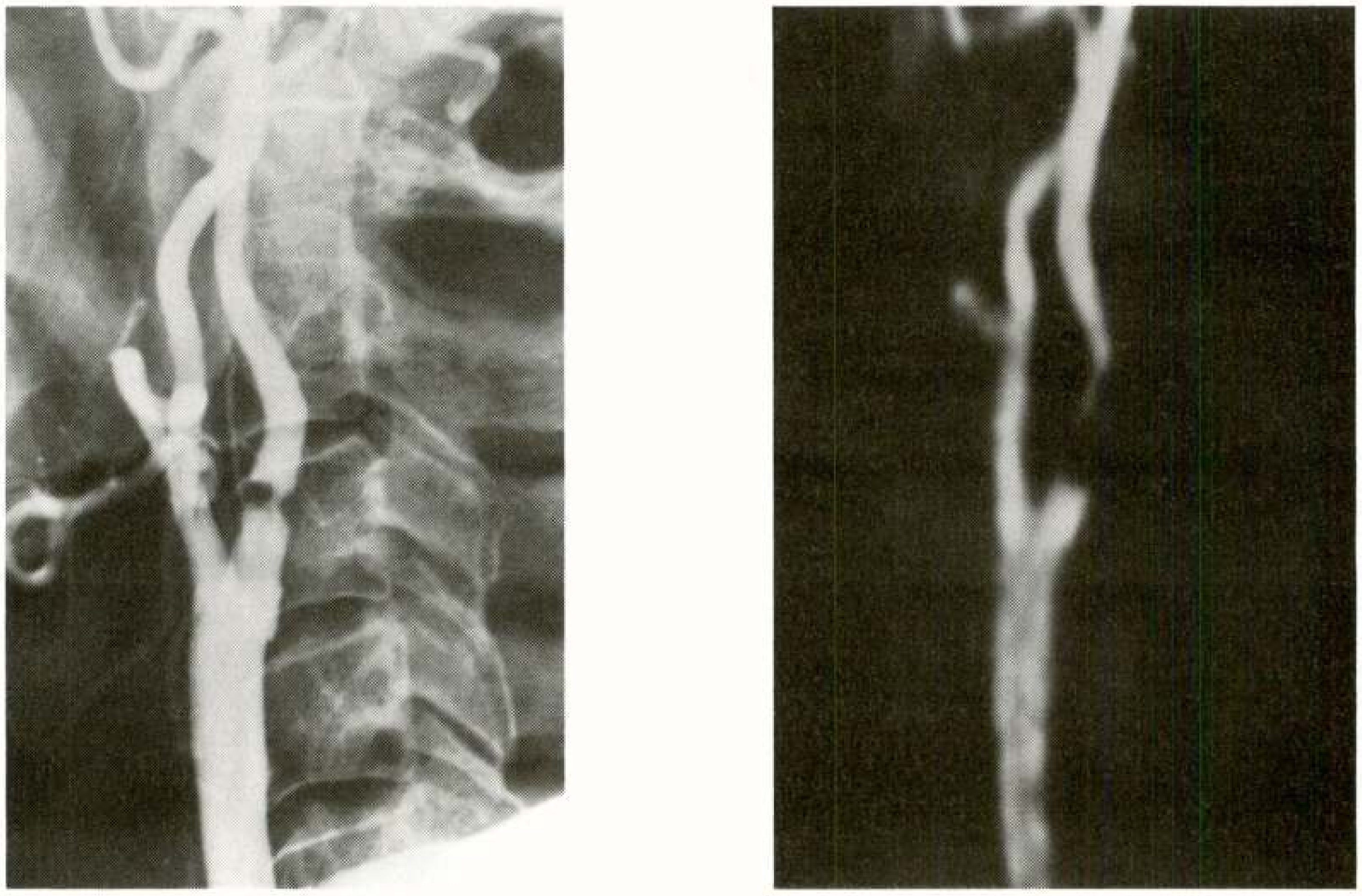
Figuur 5: 2D time-of-flight onderzoek van de halsvaten van een gezonde vrijwilliger. Het onderzoek omvatte 64 axiale plakken van 3 mm met een overlap van 1mm en werd uitgevoerd op een 1.5T MR scanner (Philips Gyroscan S15). In (a) een sagittale overzichtsopname van het gebied met aangegeven het niveau van de opnamen in (b) en (c); in (b) transversale 2D TOF opname van de halsvaten op het in (a) aangegeven niveau (bovenaanzicht van de plak); arteriën en venen zijn hyperintens door het instroomeffect (vgl. figuur 2, a); in (c) hetzelfde, maar met toepassing van een craniële presaturatie ter onderdrukking van het veneuze signaal (vgl. figuur 2, b); in (d) zijwaartse maximum-intensity projectie van de data set voor de rechter carotidenbifurcatie.

Toepassingen van MRA zijn tot op heden met name beschreven op het gebied van de intra- en extracraniële circulatie en betreffen het aantonen en vervolgen van aneurysmata, arterio-veneuze malformaties, tumoren en atherosclerotische plaques. Goed gedocumenteerde prospectieve trials ontbreken evenwel nagenoeg.

Hoewel de praktische waarde van MRA thans nog zeer beperkt is, vormt MRA in principe een zodanig aantrekkelijke methode van vaatonderzoek, dat nader onderzoek op dit gebied gerechtvaardigd lijkt: de methode is niet-invasief en niet-verstorend, de intrinsieke gevoeligheid voor stroming maakt toediening van contrastmiddelen overbodig, zowel de bloed- als liquordynamica kunnen kwalitatief en kwantitatief worden bestudeerd, vaatstructuren kunnen ruimtelijk worden weergegeven, bot en lucht vormen geen belemmering, en door toepassing van presaturatietechnieken en geschikte detectiespoelen is een zekere selectiviteit van de angiogrammen te realiseren.

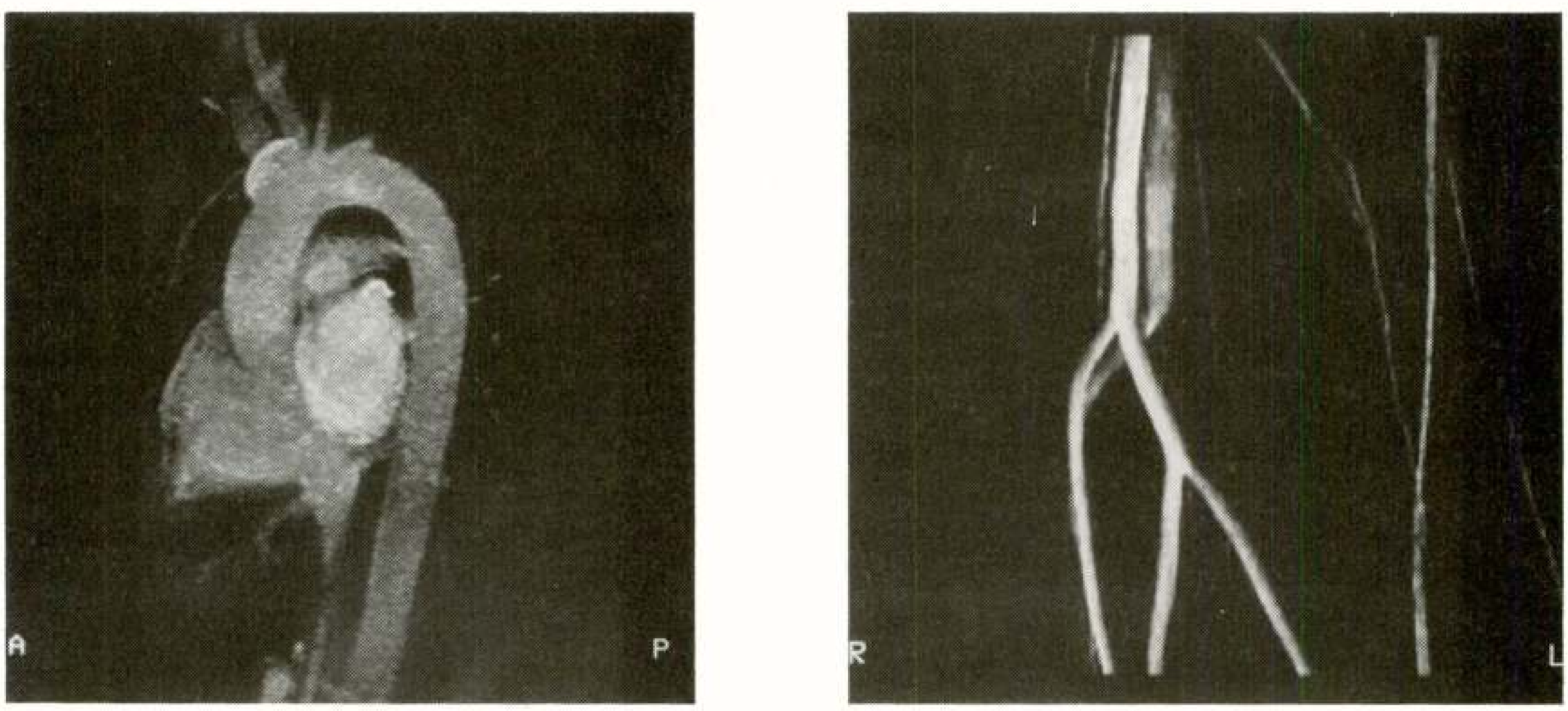
6. Referenties

1. Edelman R.R., Mattle H.P., Atkinson D.J., Hoogewoud H.M.. MR angiography: a review. AJR 1990;154:937-46.
2. Edelman R.R., Rubin J.B., Buxton R.B.. Flow. In: Hesselink & Edelman eds. Clinical magnetic resonance imaging. Philadelphia: WB Saunders: 1990; 109-184.
3. Haacke E.M., Lin W. Technologic advances in magnetic resonance angiography. Current Opinion in Radiology 1991;3:240-7.



a b

Figuur 6: Conventioneel angiogram (a) en overeenkomstig MRA projectiebeeld (b) van een patiënt met een stenose van de A. carotis interna (2D TOF, 64 x 3mm, 1 mm overlap, craniële presaturatie, 1.5T, scantijd 20 min.).



a b

Figuur 7: Recente ontwikkelingen op het gebied van de MR angiografie: toepassing van snelle acquisitietechnieken ter verbetering van de kwaliteit van 2D TOF studies van o.m. het hart en de aortaboog (a), en toepassing van spoelen met gunstige detectie-eigenschappen en een groot gezichtsveld, bijv. voor onderzoek van de A. poplitea trifurcatie (b). De weergegeven studies werden uitgevoerd op een 1.5T scanner (Philips Gyroscan ACS-II).

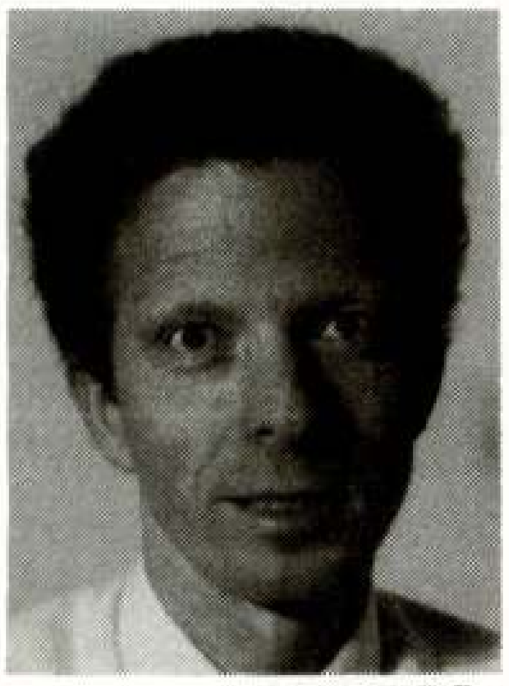
4. Lanzer P., Yoganathan A.P. (Eds.), Vascular imaging by color doppler and magnetic resonance, Springer Verlag, Berlijn, 1992
5. Potchen E.J., Haacke E.M., Siebert J.E., Gottschalk A., Magnetic resonance angiography; concepts and applications, Mosby, St Louis, 1993
6. SMRM Workshop on Magnetic Resonance Imaging of Blood Flow, Philadelphia, March 13-14, 1989: Mag Res Med 1990;14:171-321.
7. Vogl T.J.. Kernspintomographie der Kopf-Hals-Region. Berlin: Springer Verlag, 1991.

Een uitgebreidere versie van dit artikel werd eerder afgedrukt in het Nederlands Tijdschrift voor Geneeskunde 1993; 137:345-350.

Voordracht gehouden tijdens de 407e werkvergadering.

IEEE BENELUX
NEDERLANDS ELEKTRONICA- EN RADIOGENOOTSCHAP
407e werkvergadering

UITNODIGING voor de lezingenavond van het IEEE en het NERG op maandag 14 december 1992 in de collegezaal K1, gebouw 1 van het Academisch Ziekenhuis, Rijnsburgerweg 10, Leiden.



DR. J. DOORNBOS,

THEMA: MAGNETIC RESONANCE IMAGING

PROGRAMMA:

18.30 - 19.00 uur:	Ontvangst
19.00 - 19.05 uur:	Opening, introductie **PROF. DR. IR. E. BACKER,** Technische Universiteit Delft
19.05 - 19.30 uur:	Basale MRI Beeldvorming **DR. J. DOORNBOS,** Academisch Ziekenhuis Leiden
19.30 - 20.00 uur:	Basale Beeldverwerking **DR. IR. J. J. GERBRANDS,** Technische Universiteit Delft
20.00 - 20.30 uur:	Kwantitatieve technieken, m.n. gericht op cardiologie **DR. IR. J. H. C. REIBER,** Academisch Ziekenhuis Leiden
20.30 - 21.00 uur:	PAUZE
21.00 - 21.30 uur:	Geavanceerde MRI technieken, in het bijzonder MRA **DR. C. J. G. BAKKER,** Academisch Ziekenhuis Utrecht
21.30 - 22.00 uur:	Relatie met andere beeldmodaliteiten, 3D visualisatie **PROF. DR. IR. M. A. VIERGEVER,** Rijksuniversiteit Utrecht

Aanmelding voor deze avond dient te geschieden vóór 7 december 1992 door middel van de aangehechte kaart, gefrankeerd met een postzegel van 60 cent.

Namens de deelnemende verenigingen,

Dr. Ir. J. Vanderschoot
IEEE Benelux Conference Coordinator
Tel. 071 - 276793

Leiden, november 1992.

Siliciumcompilatie voor gemengd analoog-digitaal ontwerp

Dr. Ir. D.M.W. Leenaerts
Technische Universiteit Eindhoven

Abstract

Silicon compilation for mixed analog-digital design. In this article the state of art in analog silicon compilation will be given. The problems, which will arise when one tries to automate the design process for mixed analog-digital circuits, will be treated. Hereby we will focuss ourselves on the four main steps within the design process, e.g. topology selection, sizing and optimization, verification and layout generation.

I. Inleiding

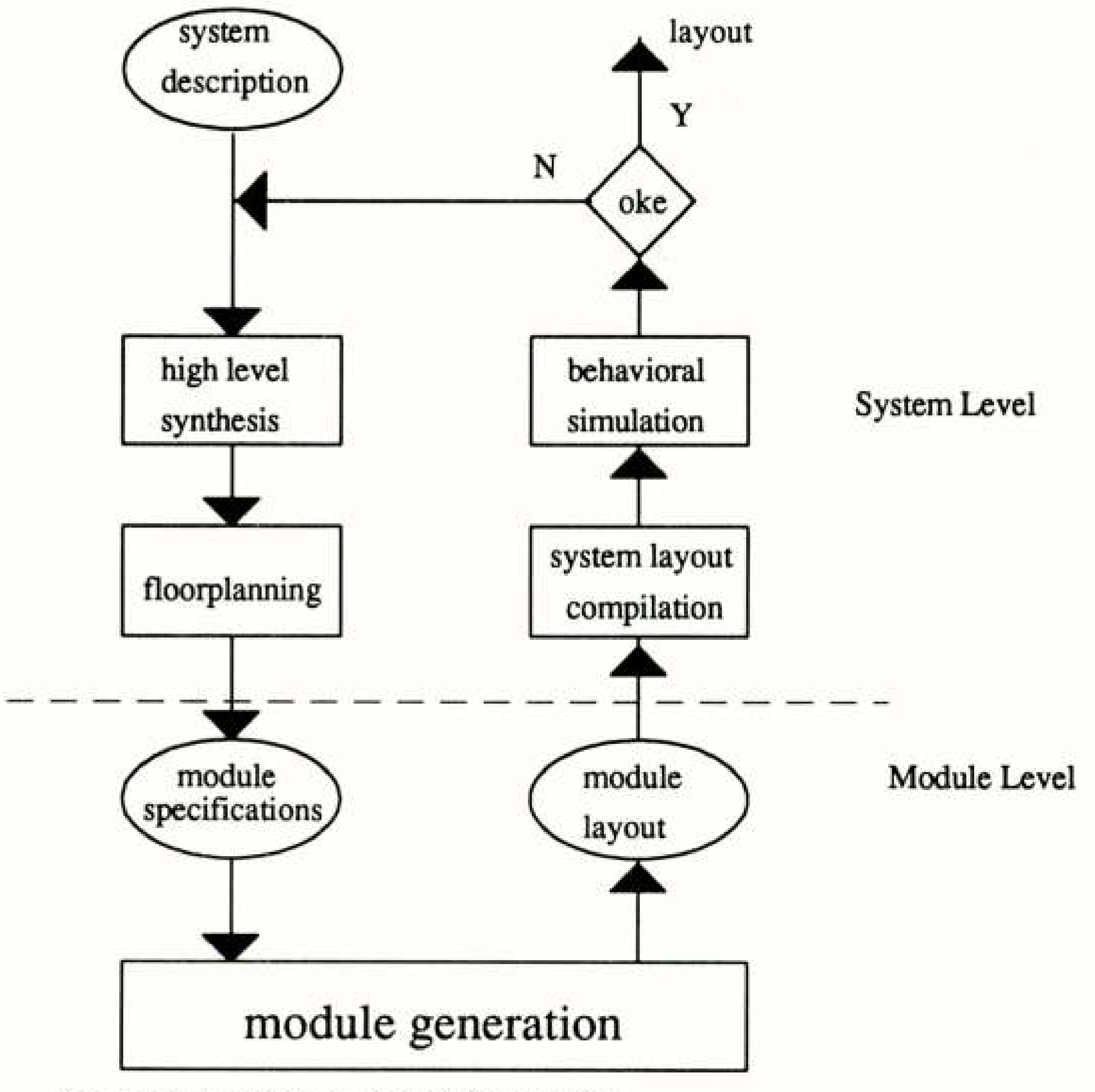
In navolging van de digitale werkomgeving is men sinds midden jaren tachtig begonnen om ook het analoog en gemengd analoog-digtaal ontwerpen te automatiseren. Het uiteindelijke doel is te komen tot een silicium compiler (Si-compiler) welke de gevraagde functionaliteit (deels) automatisch omzet naar werkend silicium. De ontwikkeling van deze Si-compiler werd ingegeven door een aantal redenen, waarvan een aantal hieronder weergegeven zijn:

- Het ontwerpen van analoge schakelingen kost erg veel tijd in vergelijking met digitale circuits. Daar sommige functies niet anders dan in analoge techniek gerealiseerd kunnen worden, is het zinvol om te zoeken naar methodieken om de ontwerptijd te reduceren.
- Hoewel het primaire doel van een Si-compiler het afleveren van een layout is, kan men dit ontwerpgereedschap ook uitstekend gebruiken om aankomende analoge ontwerpers te trainen. Immers, de ontwerpkennis is nu op een gestructureerde manier gedocumenteerd en opgeslagen in de compiler en via een interaktieve mode kan men kennisoverdracht doen laten plaatsvinden.
- Men is in staat om steeds meer functionaliteit per oppervlak te integreren. Dit betekent dat grote systemen nu binnen het bereik komen van volledige intergatie op een chip. Systeemontwerpers hebben vaak niet de kennis hoe daadwerkelijk (analoge) circuits op transistor niveau ontworpen dienen te worden en voor hun kunnen Si-compilers een uitkomst bieden.
- De complexiteit van de te ontwerpen systemen laat het niet meer toe het ontwerpen zonder hulpmiddelen te doen. Iedereen gebruikt bijvoorbeeld een simulator om het ontwerp te verifiëren.
- Hoewel veel functionaliteit gerealiseerd kan worden met digitale circuits blijft analoge electronica belangrijk. Analoge circuits bepalen in toenemende mate de accurate werking van een gemengd analoog-digitaal ontwerp terwijl ze maar een relatief klein oppervlak beslaan.

In dit artikel zal in hoofdstuk II aandacht besteed worden aan de architectuur van een Si-compiler met een kort overzicht van bestaande synthese software pakketten in hoofdstuk III. Het zal dan blijken dat er eigenlijk nog geen compilers bestaan voor gemengd analoog-digitale systemen en de redenen hiervoor zullen in hoofdstuk IV behandeld worden. Tenslotte zullen in hoofdstuk V enkele conclusies getrokken worden.

II. Architectuur van een Si-compiler

Over het algemeen wordt een compiler in twee delen opgesplitst: het systeemniveau en het moduleniveau. Systemen hebben de complexiteit van bijvoorbeeld ISDN systemen terwijl modulen het niveau hebben van convertoren, read-out circuits etc.



Figuur 1 : Architectuur van de Si-compiler.

In figuur 1 is de algemene structuur te zien van een Si-compiler. De gebruiker geeft in een bepaalde beschrijvingstaal op wat het gedrag van het te ontwerpen systeem dient te zijn en onder welke condities dit dient te gebeuren. Vervolgens wordt bekeken welke modulen nodig zijn om deze functionaliteit te halen. Tijdens deze zogeheten hoog-niveau-synthese wordt tevens voor iedere module ook de specificaties opgesteld. Ook floorplanning, het toekennen van chipoppervlak aan een functie, vindt nu al plaats. Immers er is maar een beperkt oppervlak ter beschikking om de totale functionaliteit te realiseren en dus ook voor iedere module.

De modulegenerator vertaalt de modulespecificaties naar een layout welke aan de gestelde eisen voldoet. Op systeemniveau worden dan alle layouts verzameld en volgens het floorplan neergelegd op het beschikbare oppervlak. Nadat de modulen onderling zijn bedraad kan een circuitextractie plaatsvinden. De aldus verkregen schakeling moet vervolgens geverifieerd worden. Omdat we praten over complete systemen met duizenden transistoren is analyse op transistor niveau niet mogelijk. De complexiteit laat alleen gedragssimulaties toe en de resultaten hiervan bepalen of een herontwerp dient plaats te vinden of dat de layout voldoet aan de gestelde

eisen. In het laatste geval is de compiler klaar, in het eerste geval zal de synthese ergens het ontwerp moeten aanpassen.

De modulecompiler is een zeer belangrijke schakel in het ontwerptraject en zal hieronder verder behandeld worden. Als inputs krijgt de modulegenerator een lijst van specificaties en eventueel een set parameters van de te gebruiken procestechnologie. Vervolgens worden een aantal synthese en analyse stappen doorlopen. Deze zijn:

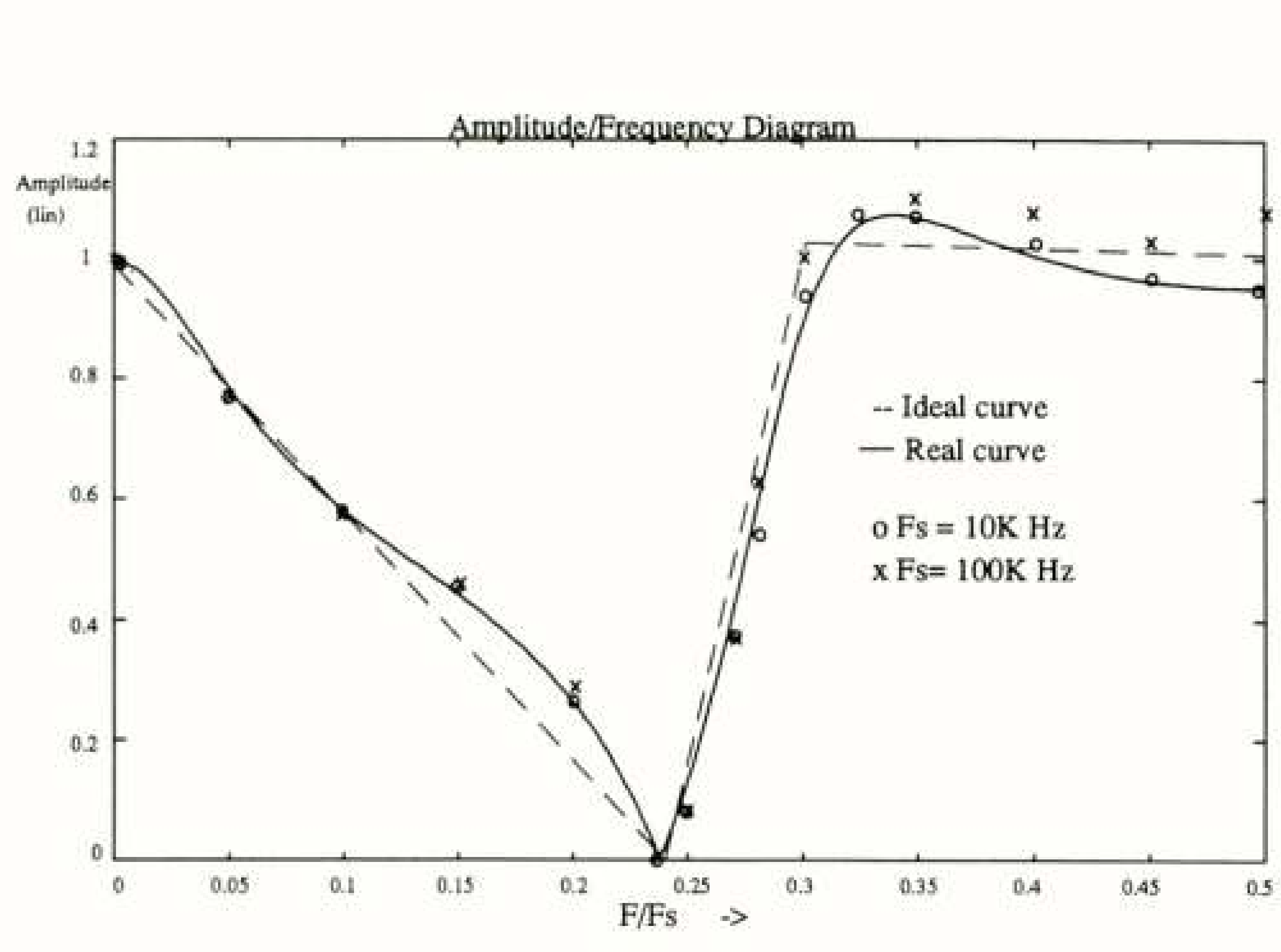
- *Topologie selectie:* de gevraagde functionaliteit kan met verschillende topologieën gerealiseerd worden, elk met hun voor- en nadelen. Slechts een zal geschikt zijn onder alle gegeven randvoorwaarden.
- *Dimensionering en optimalisatie:* de ontwerpparameters van de gekozen topologie moeten zodanige waarden krijgen dat een optimaal resultaat verkregen wordt.
- *Verificatie:* via een analyse moet geverifieerd worden of de gekozen dimensionering ook voldoet aan de eisen. Verificatie speelt een bealngrijke rol na de generatie van een layout, daar nu ook alle invloeden van parasieten meegenomen kunnen worden.
- *Layout generatie:* het gedimensioneerde circuit moet afgebeeld worden op silicium in een vooraf gekozen procestechnologie.

Indien na verificatie blijkt dat het ontwerp niet voldoet aan de randvoorwaarden, dan zal een herontwerp moeten plaatsvinden. Dit betekent dat het ontwerpproces naar een eerdere ontwerpfase terugkeert om vanaf daar opnieuw te beginnen. De voorgeschiedenis en de fout die is opgetreden bepalen in hoge mate de nieuwe ontwerpstrategie.

III. Stand van zaken

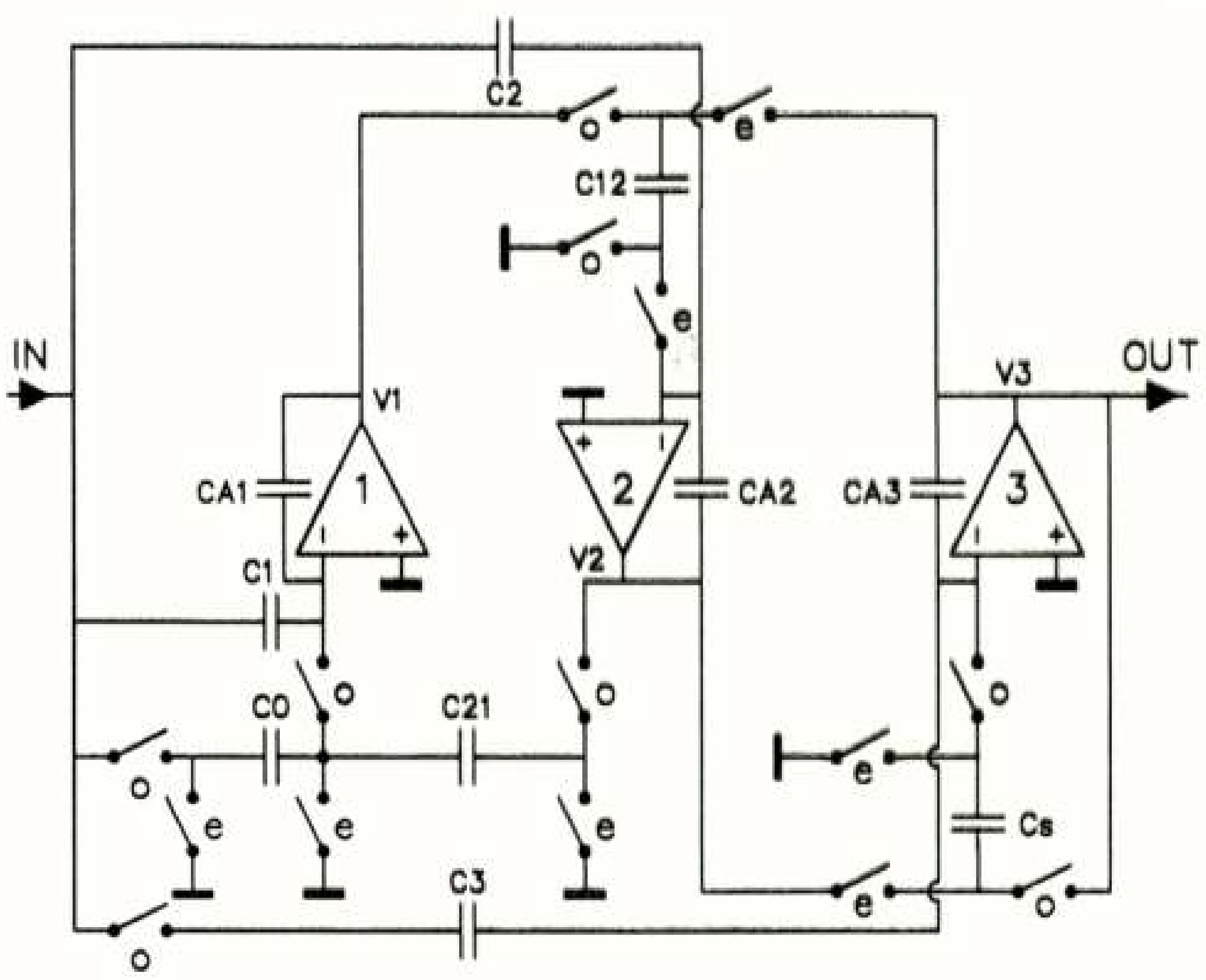
Zoals al aan het begin vermeld is men vanaf midden jaren tachtig bezig met onderzoek naar synthese-methodieken voor analoog en gemengd analoog-digitaal ontwerp [1]. Eind jaren tachtig werden de eerste resultaten gepubliceerd. Het betrof hier synthese-methodieken die men in staat stelde om simpele analoge schakelingen (operationele versterkers, comparatoren,..) automatisch te realiseren tot op het niveau van een gedimensioneerd circuit. Het genereren van een layout werd nog volledig met de hand gedaan. Enkele synthesepakketten zijn OASYS (Carnegy Mellon University) [2], ARIADNE (Katholieke Universiteit Leuven) [3], SEAS (T.U. Twente) [4] en TOPICS (T.U. Eindhoven) [5].

Om een voorbeeld te geven van TOPICS. Gegeven de ideale filter curve uit figuur 2a. Synthese levert op dat, onder voorwaarde van een derde orde



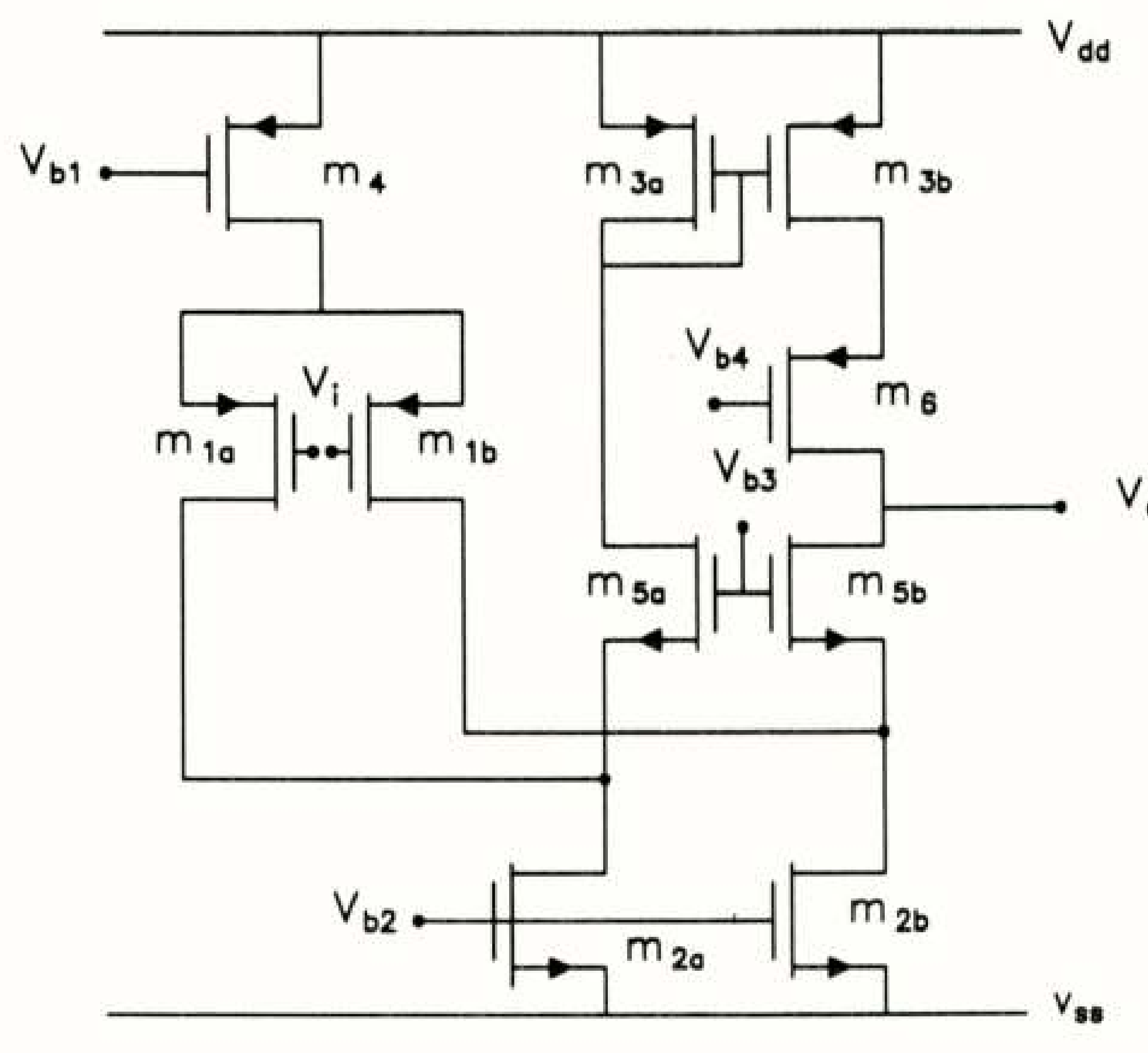
Figuur 2a: Filterkarakteristieken.

SC filter, de getrokken kromme uit figuur 2a de best benaderde situatie is waarvoor de filterstructuur gegeven is in figuur 2b. Randvoorwaarden zijn



Figuur 2b: Filterschakeling.

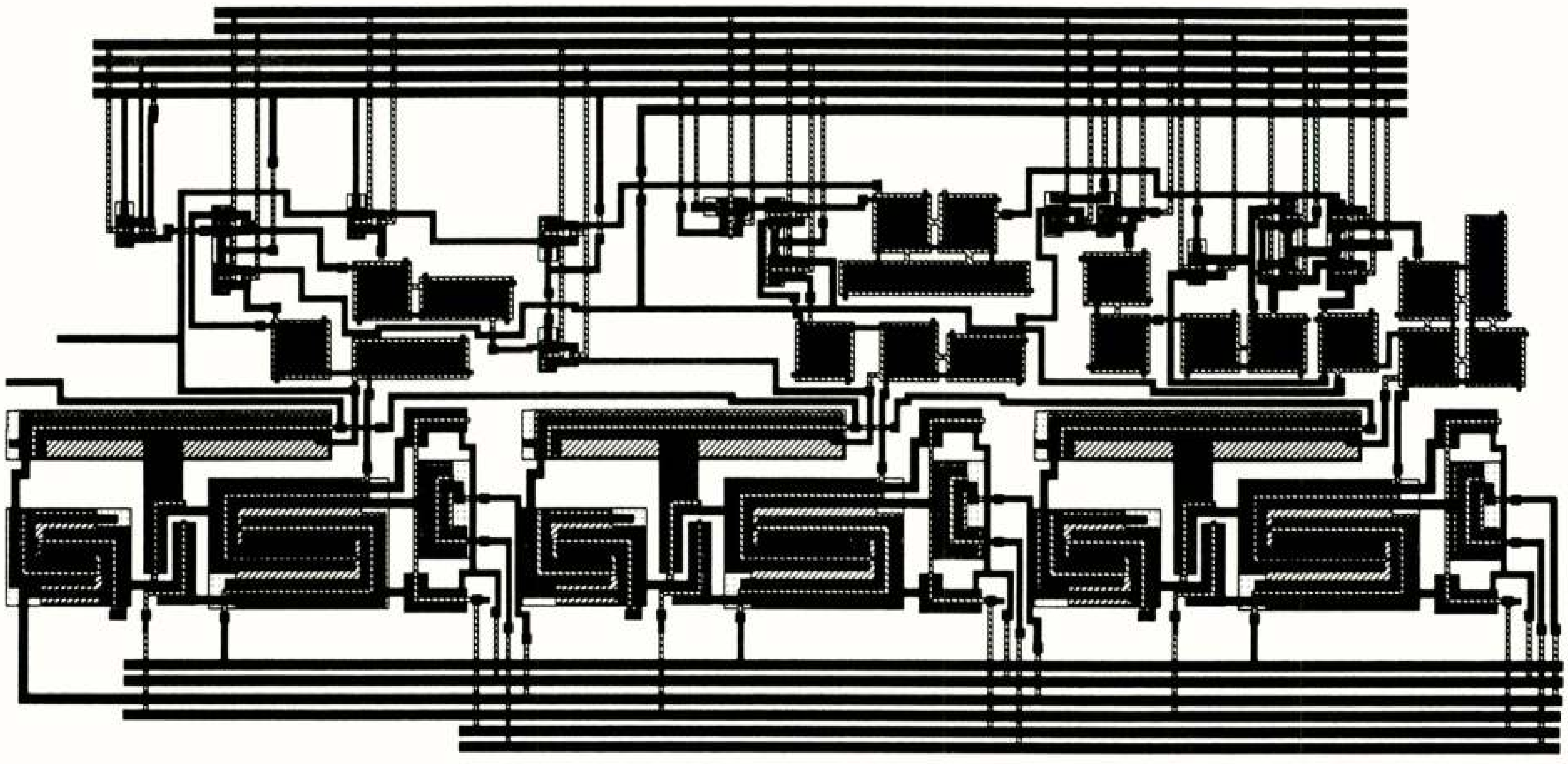
een CMOS 2.4 μm proces en een voedingsspanning van 5V. Hieruit worden dan de eisen gehaald voor de operationele versterkers, welke TOPICS daarna ontwerpt als gevouwen gecascodeerde transconductantie versterkers (OTA) (figuur 2c). Hierna moet de ontwerper zelf de layout van het filter



Figuur 2c: De OTA schakeling.

genereren, welke is weergegeven in figuur 2d. De meetresulaten van het filter zijn in figuur 2a gegeven. De metingen komen goed overeen met de verwachtingen. Echter voor hoge klokfrequenties toont het filter een afwijkend gedrag. Het is nog niet duidelijk waarom dit het geval is.

Kortom, voor simpele analoge schakelingen zijn er synthesepakketten. Dit is hoegenaamd niet het geval indien we iets zoeken voor analoge modulen, zoals convertoren, read-out circuits etc. Er bestaat een pakket IDAC [6], maar de tekortkomingen liggen in het feit dat het systeem werkt met een bibliotheek van geparameteriseerde schakelingen. Het systeem is daardoor niet flexibel en kent maar een relatief klein aantal modulen. Kijken we naar gemengd analoog-digitale modulen en systemen met de complexiteit van ISDN chips, dan moet men concluderen dat Si-compilers voor deze klasse van schakelingen nog niet bestaan.



Figuur 2d: Layout van het filter.

Blijkbaar is het ontwikkelen van Si-compilers voor deze klasse van schakelingen erg moeilijk en de vraag is dan ook waarom dit zo moeilijk is (voor digitale schakelingen bestaan al lang Si-compilers die een grote complexiteit aankunnen).

IV. Probleemgebieden

Het is ondoenlijk om alle problemen te behandelen en we zullen ons daarom beperken tot de problemen van de vier genoemde ontwerpstappen in de module generator.

- *Topologieselectie:* we hebben hier te maken met verscheidene problemen. Ten eerste moeten we bepalen hoe we gaan ontwerpen: fixed cell, parameterized cell or full custom. Dan krijgen we de keuze van de topologie. Waarop baseren we ons, op kennis uit een regelbank, op heuristiek? Of rekenen we elk ontwerp gewoon helemaal door en kijken we daarna welke de beste was? We kunnen ook de gebruiker bij de besluitvorming betrekken, hoewel dit alleen kan als deze deskundig is op het ontwerpgebied. Een ander heel belangrijk punt is dat we veelal te maken hebben met stelsel sterk niet lineaire vergelijkingen die het verband tussen enerzijds de specificaties en anderzijds tussen de ontwerpparameters beschrijven. Vaak zijn de vergelijkingen onderbepaald, resulterend in het feit dat meerdere oplossingen mogelijk zijn. Het oplossen van dit soort stelsels is een buitengewoon moeilijk probleem.
- *Dimensionering en optimalisatie:* naast het feit dat we moeten kiezen tussen een globale (traag) of lokale (snel) optimalisatie routine is het grootste probleem hoe we aan de analytische modellen komen. Deze modellen moeten het gedrag tussen specificatie en ontwerpparameter vastleggen. We kunnen hiervoor een simulator gebruiken, waardoor we wel accurate resultaten krijgen maar hetgeen convergentie problemen met zich meebrengt naast het feit dat dit een bijzonder trage methode is. We kunnen de modellen ook zelf trachten te maken, maar het is bijzonder lastig om analoge specificaties zoals ruis, distortie en temperatuurafhankelijkheid goed te modelleren.
- *Verificatie:* omdat het ontwerpen top-down gebeurt komt het voor dat bepaalde delen van een schakeling al op transistorniveau ontwerpen zijn terwijl andere delen pas op macroniveau ontworpen zijn. We hebben dus te maken met gemengd niveau simulaties naast het feit dat ook gemengd signaal analyses gedaan moeten kunnen worden. Elk domein toekennen aan een specifieke simulator geeft convergentie problemen. We kunnen ook een enkele simulator gebruiken zoals een stuksgewijs lineaire (PL) simulator [7]. Dit type simulator heeft als voordeel dat genoemde simulatievormen inherent zijn aan het principe waarop ze gebaseerd zijn. De convergentie-eigenschappen zijn erg goed. Helaas zijn PL-simulatoren op transistorniveau trager dan SPICE-achtige simulatoren onder dezelfde nauwkeurigheid.
- *Layout generatie:* tot nu toe wordt de generatie van een analoge schakeling met de hand gedaan, gewoonweg omdat er nog niets bestaat om dit automatisch te doen. Redenen daarvoor zijn dat de uiterst belangrijke aspecten zoals symmetrie, matching, temperatuurgradiënten over de chip, invloeden van digitale componenten op de analoge, heel erg moeilijk te vertalen zijn naar algoritmen die hier rekening mee houden tijdens het layouten.

Hierboven zijn in het kort een aantal problemen geschetst waarmee men te maken heeft bij het automatiseren van het ontwerpproces binnen een modulegenerator. Daarnaast zijn er ook op hoger niveau een aantal belangrijke problemen te melden. Een ervan is de ontwikkeling van een beschrijvingstaal voor gemengd analoog-digitaal schakelingen. De beschrijvingstaal VHDL voor digitale circuits is hiervoor niet geschikt, omdat deze taal bijvoorbeeld niet in staat is om analoge signalen te beschrijven. Andere problemen liggen op het vlak van de gedragssimulator en het toevoegen van teststructuren en testpatronen.

V. Conclusie

Het moge duidelijk zijn dat het nog wel een aantal jaren zal duren voordat een silicium compiler voor gemengd analoog-digitale systemen (uit)ontwikkeld is. In dit artikel zijn een aantal zaken behandeld die aangeven waar de problemen liggen binnen het automatiseringstraject. Daarnaast moeten we echter ook concluderen dat het automatiseren van het ontwerpen van dit soort schakeling hard nodig is daar de complexiteit van de systemen het niet meer toelaat dit met de hand te doen in de toekomst.

VI. Literatuur

1. P.E. Allen, "A tutorial-computer aided design of analog integrated circuits", IEEE CICC p. 608-616, 1986.
2. R. Harjani, et.al. "OASYS: a framework for analog circuit synthesis", IEEE trans. CAD, vol. 8, no.12, p. 1247-1266, 1989.
3. G. Gielen, W. Sansen, *Symbolic analysis for automated design of analog integrated circuits,* Kluwer Academic Press, 1991.
4. Zhen-Qiu Neng, et.al., "SEAS: a simulated evolution approach for analog circuit synthesis", proc. CICC '91, May 12-15, 1991, San Diego.
5. D.M.W. Leenaerts, *TOPICS, a contribution to analog design automation,* dissertatie Technische Universiteit Eindhoven 1992.
6. M.G. Degrauwe, "IDAC: an interactive design tool for analog CMOS circuits", IEEE journal of Solid-State Circuits, vol. SC-22, no. 6, p. 1106-1116, 1987.
7. T.A.M. Kevenaar, D.M.W. Leenaerts, "A flexible hierarchical piecewise linear simulator", VLSI, the integration journal, vol. 12, p. 211-235, 1991.

Voordracht gehouden tijdens de 408e werkvergadering.

MOS Translinear Circuits

Remco J. Wiegerink
MESA Research Institute, University of Twente

Abstract - Recently, it was proposed to generalize the well-known translinear circuit principle in such a way that it also applies to MOS transistors operated in strong inversion. In this paper, the MOS translinear (MTL) principle will be briefly reviewed. A graphical analysis method for MTL-circuits will be presented. This method was implemented in a computer program, which is now used as an interactive design tool to implement nonlinear signal processing functions by MTL circuits.

I. Introduction

The translinear (TL) principle was originally formulated as a practical means of implementing nonlinear signal processing functions by bipolar analog circuits [1]. The concept translinear was based on a fundamental property of bipolar transistors, namely *trans*conductance *linear* with collector current. This property, when applied in circuits consisting of loops of junction voltages and having inputs and outputs in the form of currents, allows the implementation of exact, temperature- and process-insensitive signal processing functions.

Systematic techniques for the analysis and synthesis of TL circuits have been developed [2], [3]. Useful applications have been found, such as wide-band current amplifiers [4], four-quadrant multipliers [5], triangle-wave-to-sine-wave convertors [6], improved class-AB power output stages [7], and many others [2].

The recent emergence of CMOS analog circuit techniques has prompted the question whether a similar circuit principle can be found for MOS circuits. Of course, MOS transistors applied in weak-inversion yield exponential voltage-current behaviour as is the case with bipolar transistors. However, the dynamic range and speed of such circuits are too low for general application due to the limitations of MOS transistors operated in weak inversion [2], [8]. Of more interest would be a circuit principle based on the square-law characteristic of MOS transistors operated in strong inversion [9], [10]. Therefore, it was proposed to generalize the translinear concept to apply to devices having *trans*conductance *linear* with an electrical variable such as current or voltage [11], [12]. This new, generalized translinear principle applies to both bipolar transistors and MOS transistors operating in strong inversion.

In this paper, the MOS translinear (MTL) principle will be briefly reviewed in section II. Next, in section III, it will be shown how MTL circuits can be analyzed and synthesized. In section IV, a simple graphical representation method will be presented. This graphical method is useful to gain insight into the behaviour of MOS translinear circuits. The graphical representation was implemented in the computer program MTLPLOT, which will be discussed in section V. The computer program can be used as a fast interactive design tool to implement nonlinear signal processing functions by MTL circuits. Finally, in section VI a class-AB control circuit for rail-to-rail CMOS output stages will be presented as an example MTL circuit [12], [13].

II. The MOS translinear (MTL) circuit principle

The MTL principle is valid for a loop of MOS transistors, as indicated in fig. 1. In the loop, the gate-source voltages are connected in series, with equal numbers of transistors arranged clockwise and counter-clockwise in the loop. This is an essential requirement. It follows that the loop must contain an even number of devices. The current sources shown in fig. 1 are bias or signal currents. The drain terminals are assumed to be biased in such a way that all transistors operate in saturation. The drains can be connected to nodes of the loops or to other parts of the circuit in many different ways, thus determining the current distribution. From Kirchhoff's voltage law, it follows that

$$\sum_{cw} V_{gs} = \sum_{ccw} V_{gs} \tag{1}$$

where the subscripts *cw* and *ccw* indicate the devices connected clockwise and counter-clockwise in the loop, respectively. Next, we apply the square-law model of an ideal saturated MOS transistor, operated in strong inversion:

$$I_d = k(V_{gs}-V_{th})^2 \tag{2}$$

where: I_d = the drain current
V_{gs} = the gate-source voltage
V_{th} = the threshold voltage
$k = \frac{1}{2}\mu C_{ox}\frac{W}{L}$
μ = carrier mobility
C_{ox} = gate-oxide capacitance per unit-area
W = channel width
L = channel length

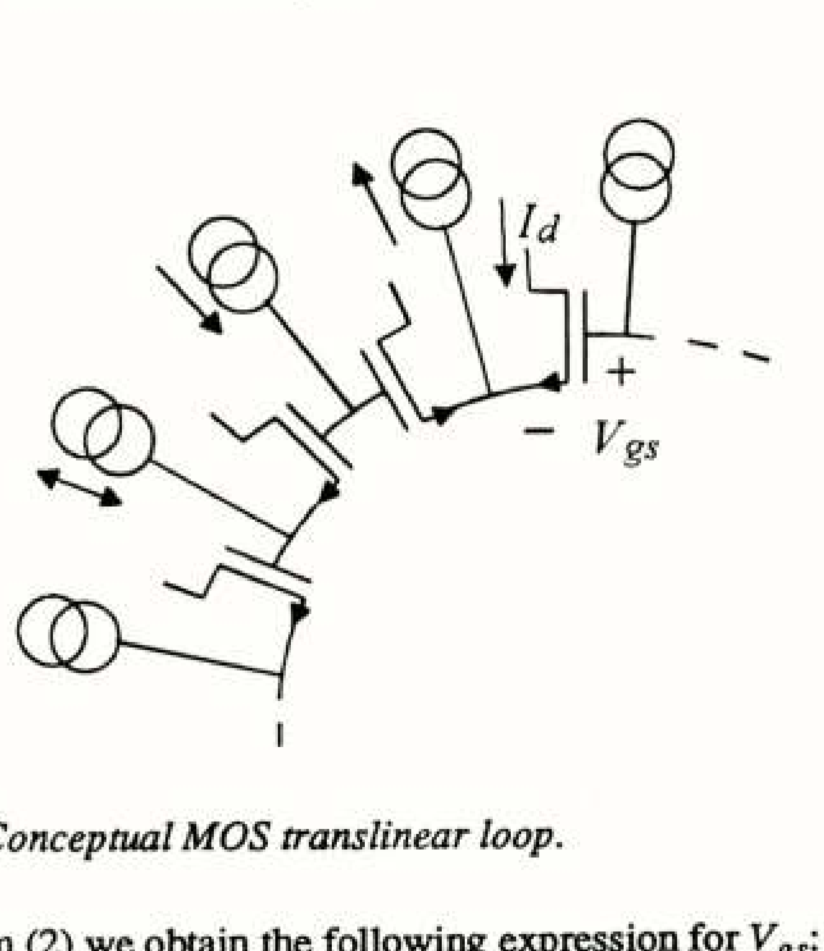


Fig. 1 Conceptual MOS translinear loop.

From (2) we obtain the following expression for V_{gs}:

$$V_{gs} = V_{th} + \sqrt{\frac{I_d}{k}} \tag{3}$$

Substituting (3) into (1) results in:

$$\sum_{cw}\left(V_{th} + \sqrt{\frac{I_d}{k}}\right) = \sum_{ccw}\left(V_{th} + \sqrt{\frac{I_d}{k}}\right) \tag{4}$$

Since equal numbers of devices are present in the clockwise and counter-clockwise directions, the number of threshold voltage terms on both sides of (4) are equal. Assuming well-matched threshold voltages (monolithic construction and uniform temperature) and neglecting the body effect allows the threshold voltages to be dropped. Also, the parameters μ and C_{ox} will then be common and thus cancel. Now (4) reduces to:

$$\sum_{cw}\sqrt{\frac{I_d}{W/L}}=\sum_{ccw}\sqrt{\frac{I_d}{W/L}} \tag{5}$$

with W/L the temperature- and process-independent aspect ratio determined by the designer. Relation (5) is a statement of the MTL principle. It is a simple algebraic relation between the MOS transistor currents and it is insensitive to temperature and processing.

III. Analysis and synthesis of MOS translinear circuits

In general, for a practical MTL circuit a sum-of-square-roots equation like equation (5) can be obtained by simple inspection of the circuit. For example, for the circuit in fig. 2 it is clear that M_1, M_2, M_3 and M_4 are connected in a translinear loop. Therefore, (5) is valid and we have the following relation between the drain currents in the circuit:

$$\sqrt{\frac{I_1}{4}}+\sqrt{\frac{I_2}{4}}=\sqrt{I_3}+\sqrt{I_4} \tag{6}$$

We can also obtain expressions for the drain currents using Kirchhoff's current law:

$$I_1=I_2=I_x+I_y,$$
$$I_3=I_x-\frac{1}{2}I_z,$$
$$I_4=I_y-\frac{1}{2}I_z \tag{7}$$

Substituting (7) into (6) results in the following temperature- and process-independent relation between the output current I_z and the input currents I_x and I_y:

$$\sqrt{I_x+I_y}=\sqrt{I_x-\frac{I_z}{2}}+\sqrt{I_y-\frac{I_z}{2}} \tag{8}$$

Solving (8) for the output current I_z gives

$$I_z=\frac{2\,I_x I_y}{I_x+I_y}, \tag{9}$$

which is the harmonic mean function.

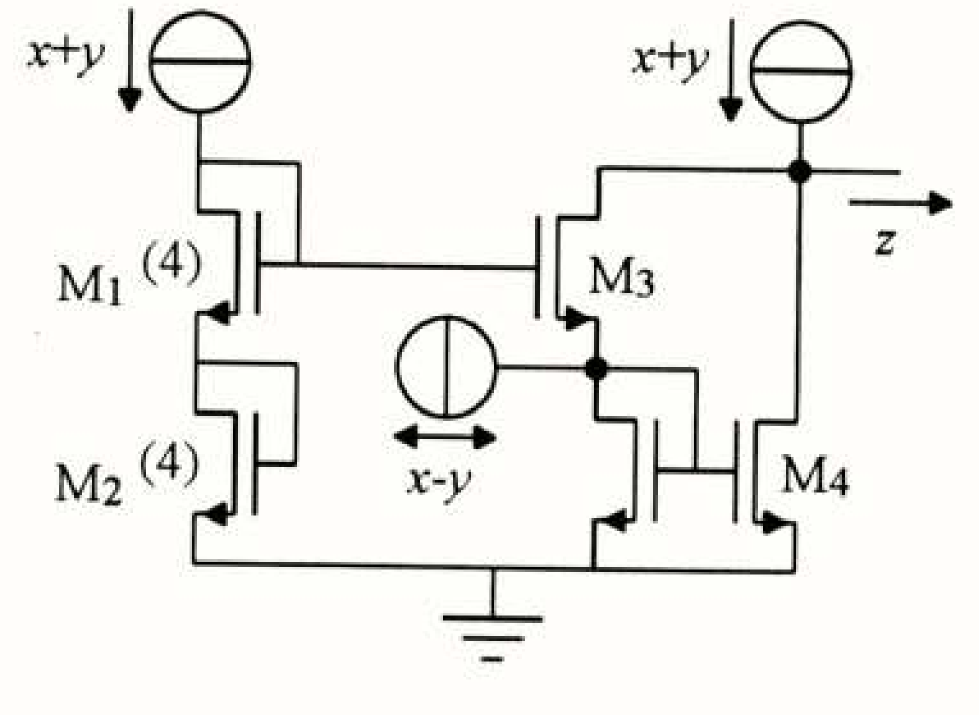


Fig. 2 An MTL-circuit realizing the harmonic mean function.

The synthesis of an MTL circuit is more complicated than the analysis. To be compatible with the MTL loop equation (5), a prescribed transfer function has to be expressed as a sum of square-root terms. For example, the vector sum function $z=\sqrt{x^2+y^2}$ can be expressed in a suitable way as follows:

$$z=\sqrt{x^2+y^2}$$
$$z^2-x^2=y^2$$
$$\sqrt{z^2-x^2}=y$$
$$z+\sqrt{z^2-x^2}=z=y$$
$$\sqrt{\frac{z-x}{2}}+\sqrt{\frac{z+x}{2}}=2\sqrt{\frac{z+y}{4}} \tag{10}$$

The resulting equation can be implemented by an MTL circuit in several ways [12].

In general, it is not easy to deal with MTL sum-of-square-roots equations mathematically. Therefore, a graphical representation was developed, which will be discussed in the next section.

IV. A simple graphical representation

A graphical representation was developed for MTL circuits having one input variable (x) and one output variable (z) [12]. In that case the drain currents of the transistors in the translinear loop can be expressed as linear combinations of a constant current, a current proportional to x and a current proportional to z. Thus, for each transistor:

$$I_{d_i}=a_i+b_i\cdot x+c_i\cdot z \tag{11}$$

where a_i represents the constant current and b_i and c_i are dimensionless multiplication factors of the currents x and z. The MTL loop-equation (5) now becomes:

$$\sum_{cw}\sqrt{\frac{a+b\cdot x+c\cdot z}{W/L}}=\sum_{ccw}\sqrt{\frac{a+b\cdot x+c\cdot z}{W/L}} \tag{12}$$

This equation is only valid if all drain currents are larger than or equal to zero. For the transistors having $b_i=c_i=0$ this means that a_i must be positive. If either b_i or c_i is not equal to zero, the condition

$$I_{d_i}=a_i+b_i\cdot x+c_i\cdot z=0 \tag{13}$$

represents a line in the x-z plane. This line is a boundary to the region where the loop-equation (12) is valid. The solution of (12) must be in this region. With the help of the graphical representation, many properties of the solution can be derived [12].

V. The computerprogram MTLPLOT

The graphical representation discussed in the previous section was implemented in the computer program MTLPLOT. The program shows the lines (13) on the video display, as indicated in fig. 3. The lines marked *cw* correspond to clockwise connected transistors; the line marked *ccw* corresponds to a counterclockwise connected transistor.

For the calculation of the solution of the MTL loop equation (12) the program exploits the fact that the solution-curves end at either a boundary-line or at the border of the video screen [12]. The program simply searches for the start of solution curves at a trajectory along the border of the validity area of the loop equation. In fig. 3 this means that the program would start in point *A* and then continu through points *B*, *C*, .., *H* until it reaches *A* again. In points *C*, *E*, *G* and *H* it detects the start or end of a solution-curve (indicated by the dashed lines). Once a single point on a solution-curve has been found, the entire curve can easily be calculated.

The way MTLPLOT finds the solutions to a loop equation results in very short calculation times. Therefore, the program was extended with

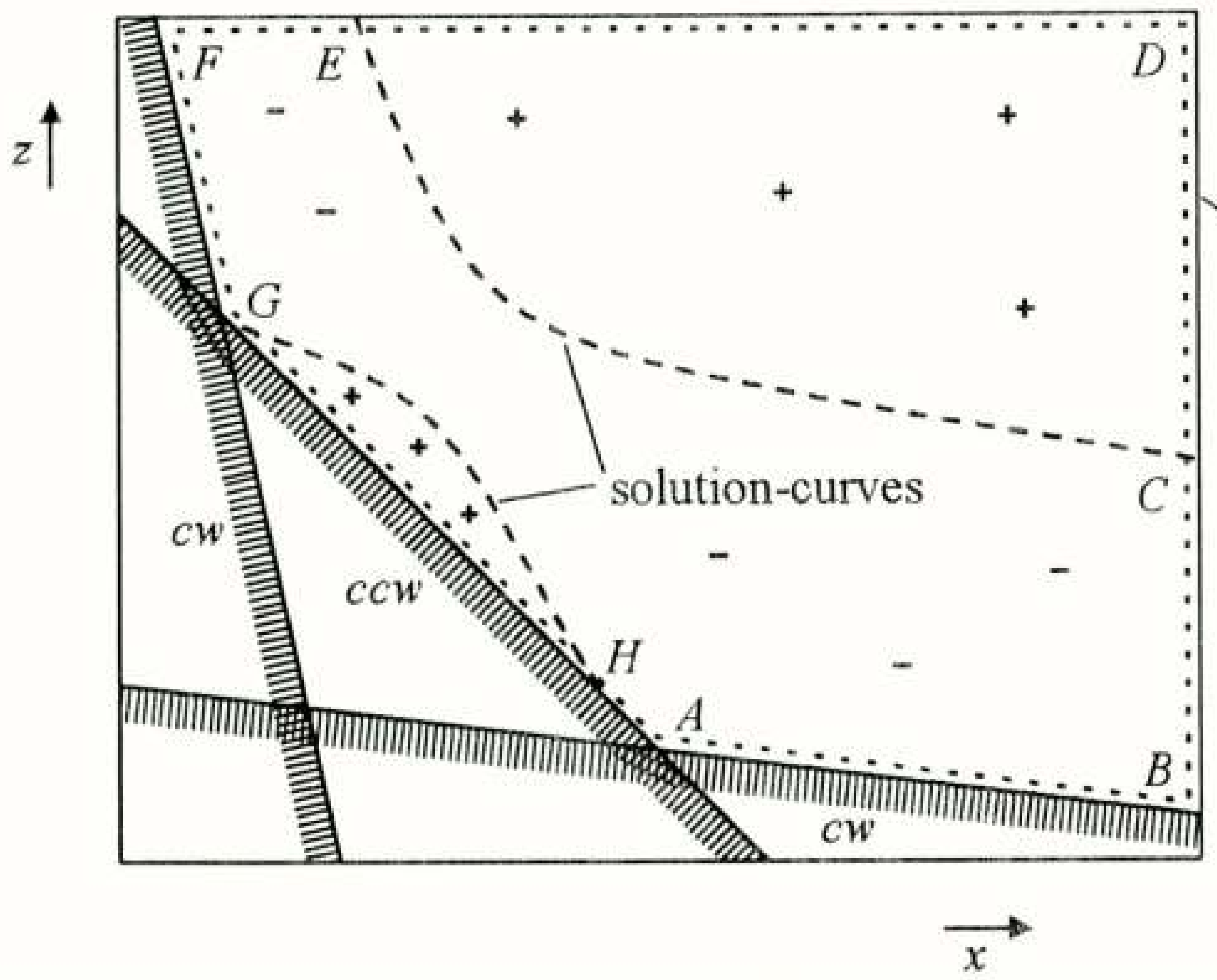


Fig. 3 MTLPLOT evaluates the MTL loop equation at a trajectory along the border of the validity area of the equation. The program starts in point A and continues via points B, C, .., H until it reaches A again. At points C, E, G and H it detects the start of a solution-curve.

features that make it a powerful interactive design tool for MTL circuits. The user can change the position of the lines (13) by simply pointing at them with the mouse pointer and dragging them to the desired position. In this way, the user can change the coefficients a, b and c and the aspect ratio's W/L in the loop equation very easily. The resulting solution, which is in fact the transfer function of the resulting MTL-circuit, is plotted immediately after each change. Furthermore, it is possible to plot the desired transfer function at the background and the user can then position the boundary-lines in a way such that the solution best approximates this function. Other useful features of MTLPLOT are an automatic optimization routine and a sensitivity analysis.

VI. Design of a class-AB control circuit for rail-to-rail CMOS output stages

An output stage which combines a rail-to-rail output voltage range and a low quiescent power consumption requires class-AB controlled output transistors in a common source configuration. Such an output stage is indicated in fig. 4. Several class-AB output stages based on this principle have been published [14], [15], [16]. In this section, an MTL-realization of the nonlinear function block that is needed to obtain the class-AB control will be presented [13]. MTLPLOT was used to find a suitable MTL loop-equation.

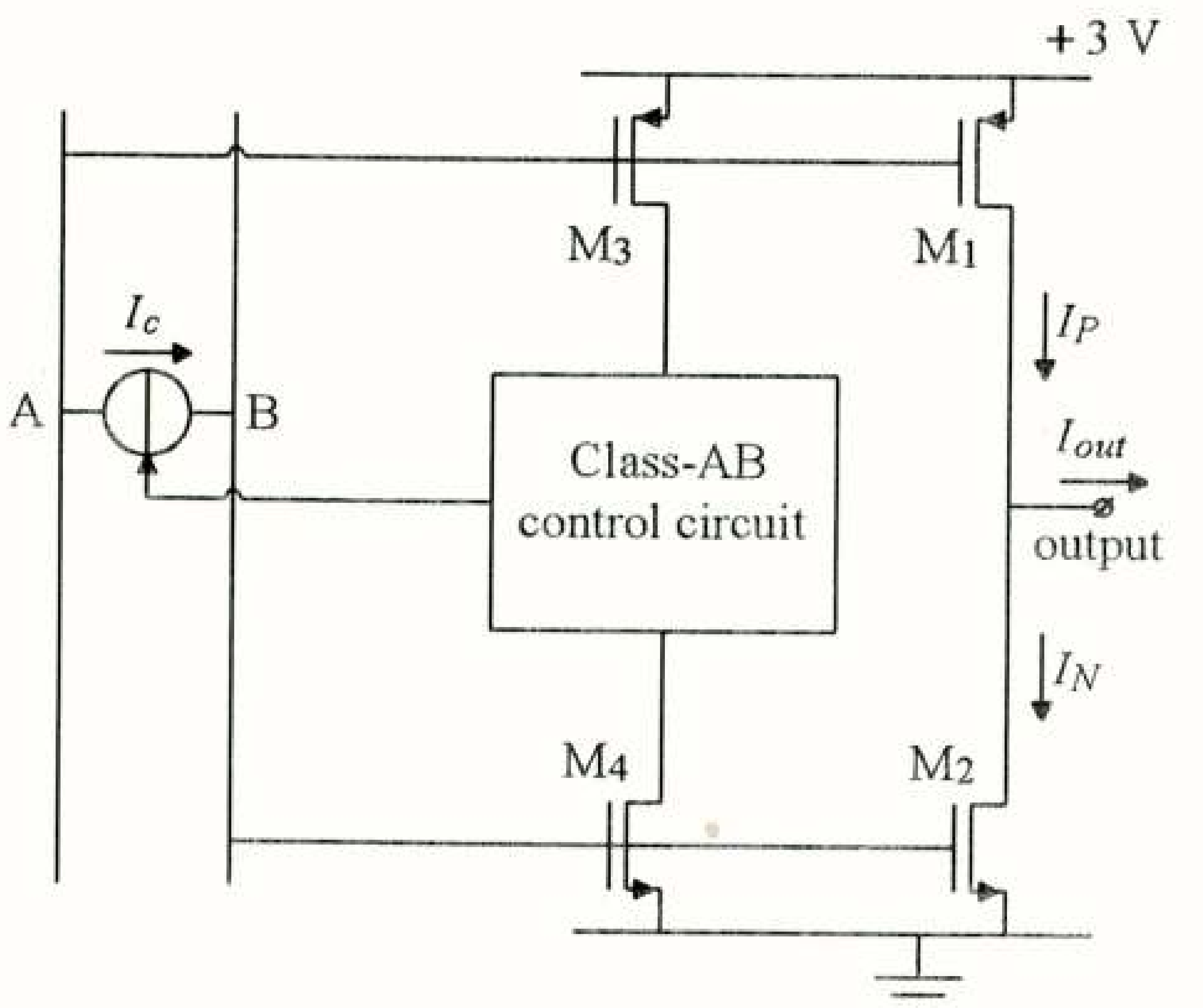


Fig. 4 Principle of a class AB rail-to-rail output stage with feedback.

First, the operation of the circuit principle of fig. 4 is explained. The currents through the output transistors M_1 and M_2 are measured by transistors M_3 and M_4 and fed to the class-AB control circuit. This circuit regulates the currents by means of I_c. The objective is that neither of the output transistors ever cuts off completely [7]. Increasing I_c leads to an increase in the drain currents of the output transistors. Decreasing I_c gives a decrease in the currents through the output transistors.

The desired relation between the drain currents of the output transistors is indicated in fig. 5*(a)*. If one of the drain currents becomes very large, the other transistor still conducts a minimum current. The exact relation between the currents is not essential. Fig. 5*(b)* shows the same relation but now plotted as a function of the output current I_{out} ($= I_P - I_N$).

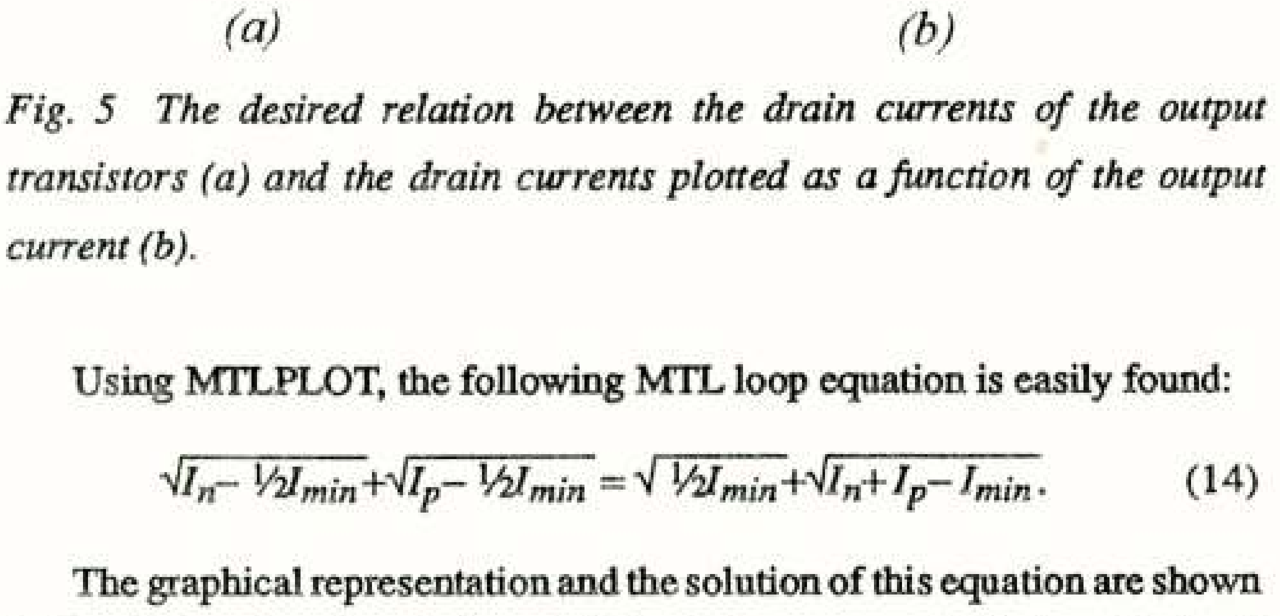


Fig. 5 The desired relation between the drain currents of the output transistors (a) and the drain currents plotted as a function of the output current (b).

Using MTLPLOT, the following MTL loop equation is easily found:

$$\sqrt{I_n - \tfrac{1}{2}I_{min}} + \sqrt{I_p - \tfrac{1}{2}I_{min}} = \sqrt{\tfrac{1}{2}I_{min}} + \sqrt{I_n + I_p - I_{min}}. \qquad (14)$$

The graphical representation and the solution of this equation are shown in fig. 6. Note that the solution (solid line) does not reach the boundaries of the validity area of the loop equation given by (13) (dashed lines). Therefore, all transistors in the translinear loop keep conducting for all possible values of I_N and I_P.

Equation (14) can now be implemented by an MTL circuit. A possible implementation is shown in fig. 7. In this circuit, transistor M_9 senses the value of I_P and M_{10} senses the value of I_N. The translinear loop is formed by M_1, M_2, M_3 and M_4. Transistors M_1 and M_2 correspond to the left-hand side of (14). The drain current of M_1 is forced equal to I_N-$\tfrac{1}{2}I_{min}$ and the drain current of M_2 is forced equal to I_P-$\tfrac{1}{2}I_{min}$. The drain currents of the

transistors connected in the opposite direction in the loop (M_3 and M_4) are forced equal to $I_N + I_P - I_{min}$ and $\frac{1}{2} \cdot I_{min}$.

If (14) is satisfied, the translinear loop M_1, M_2, M_3, M_4 will be in equilibrium and there will be no voltage difference between the inputs of differential pair M_5, M_6. If the equilibrium is disturbed this will result in a differential input voltage across this differential pair. This in turn results in a differential current between the gates of the output transistors M_7 and M_8 and the drain currents of these transistors will be adjusted until the equilibrium state defined by (14) is reached. Due to the high loop gain the differential input voltage of differential pair M_5, M_6 will always be approximately zero. The value of the bias voltage V_b should be approximately 0.5 V to ensure that all current sources operate correctly.

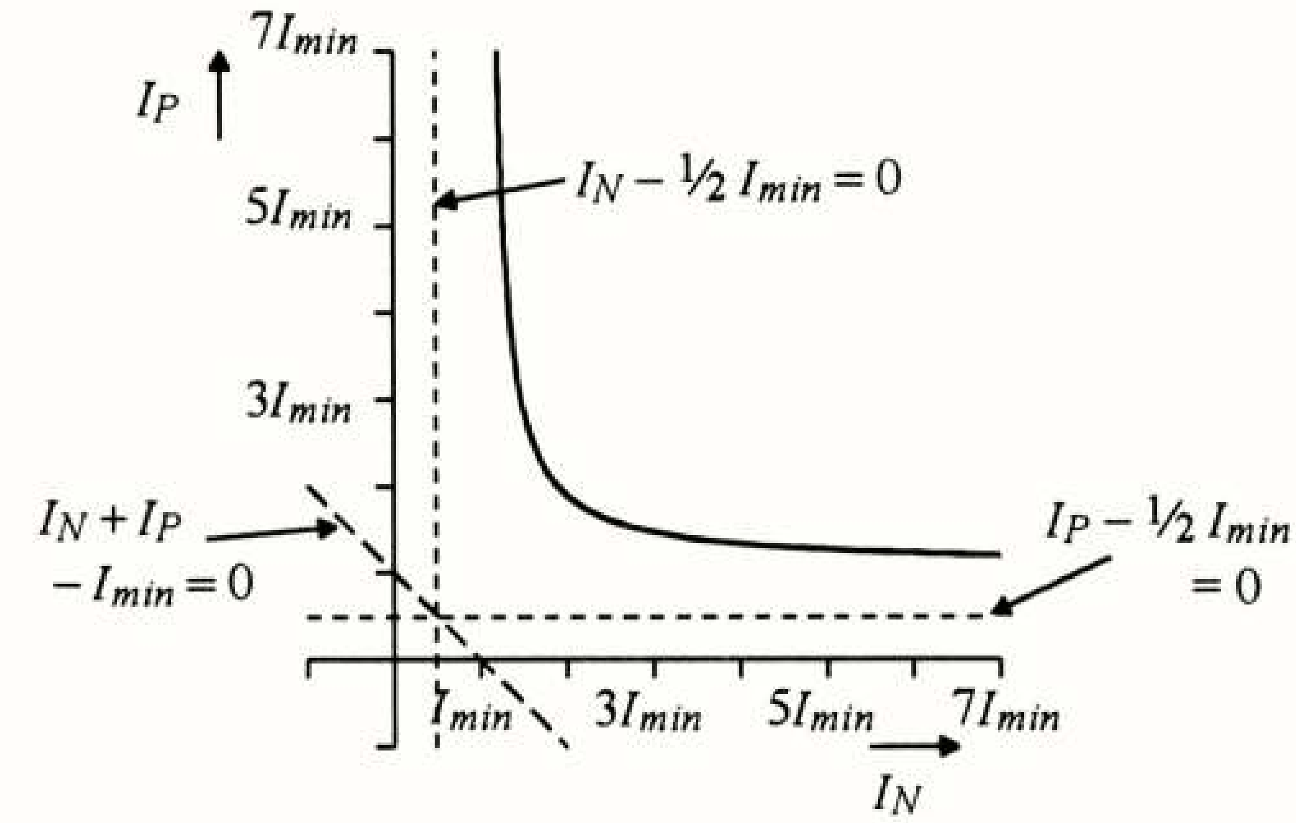


Fig. 6 Graphical representation and solution (solid line) of the loop equation (14).

The circuit of fig. 7 will be realized on our semi-custom CMOS array (ACMA, [17]) as a part of a complete operational amplifier [13]. Awaiting this realization the translinear loop M_1..M_4 was implemented on a breadboard using an ACMA containing differential pairs. The current I_N and the bias current I_{min} were forced into the loop. The differential pair M_5, M_6 was replaced by an operational amplifier controling the value of I_P. Fig. 8 shows the measured and ideal relation between I_N and I_P. The measured curve matches the response calculated by MTLPLOT almost exactly and the two curves in fig. 8 can hardly be distinguished. All transistors in the translinear loop were 100 µm wide and 10 µm long. The value of I_{min} was 10 µA.

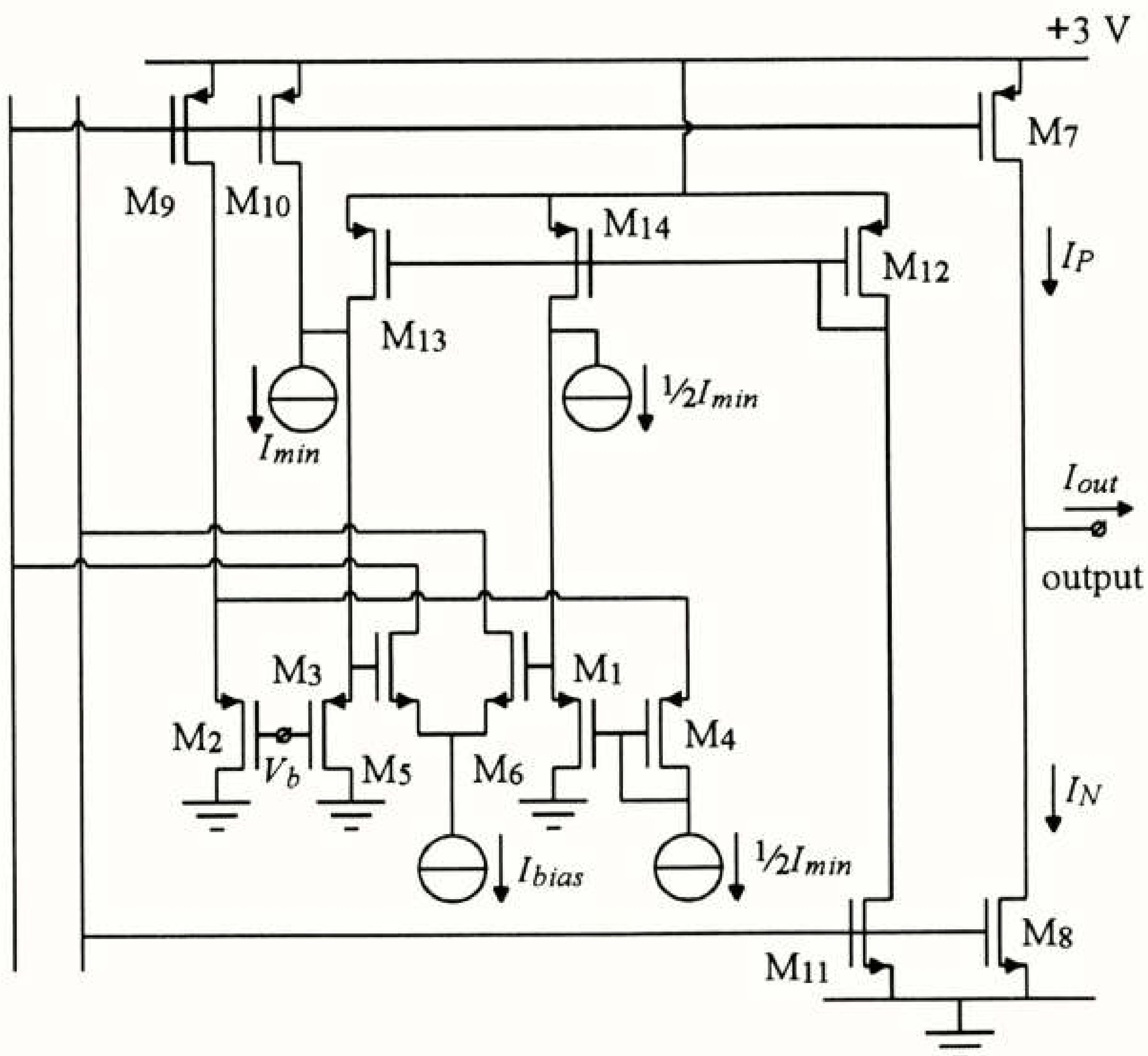


Fig. 7 A rail-to-rail output stage with a class-AB control circuit based on (14).

VII. Conclusion

In this paper it was shown that MOS translinear (MTL) circuits can be analyzed graphically. The graphical representation was implemented in the computer program MTLPLOT. Because of the high calculation speed the program can be used as a powerful interactive design tool for implementing prescribed nonlinear signal processing functions by MTL circuits.

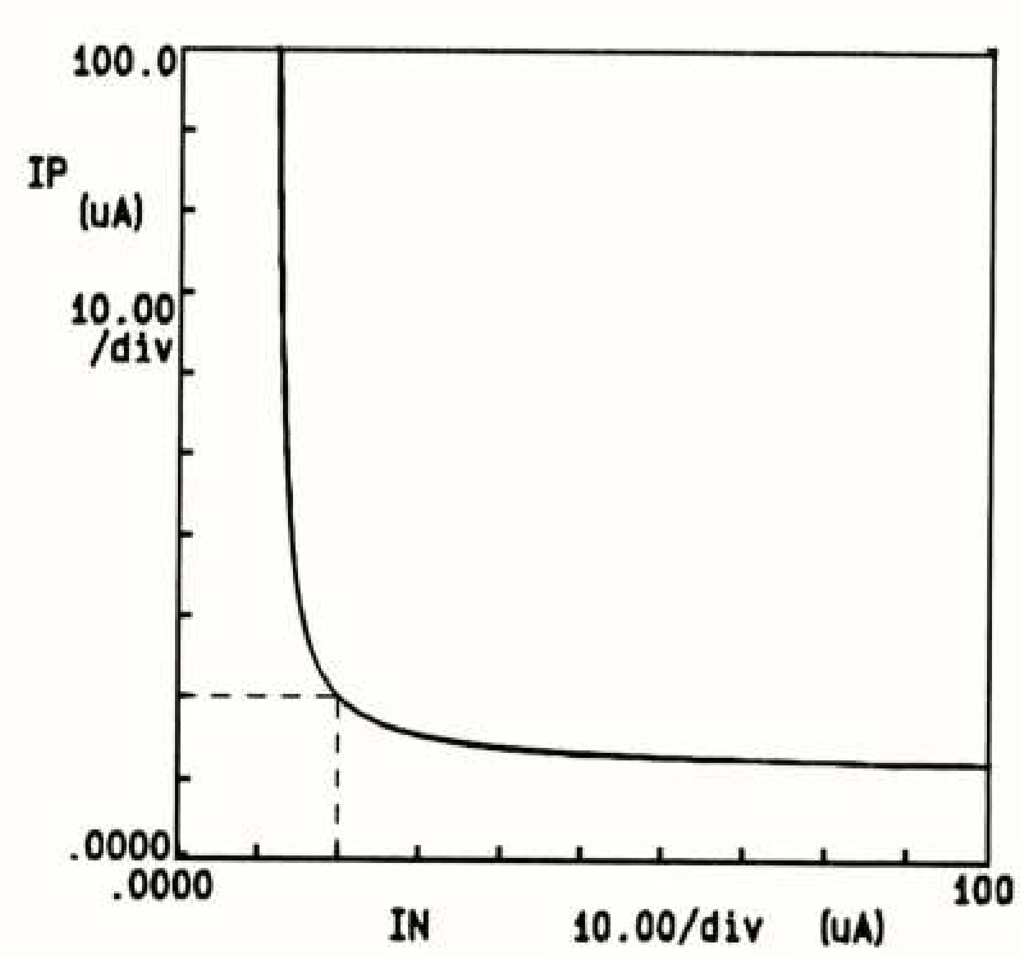


Fig. 8 Measured and ideal relation between I_N and I_P for the class AB output stage of fig. 7. The bias current I_{min} was equal to 10 µA. The two curves are almost identical and can not be distinguished.

References

[1] B. Gilbert, "Translinear circuits: a proposed classification", *Electronics Letters*, vol. 11, pp. 14-16, 1975.

[2] E. Seevinck, *Analysis and Synthesis of Translinear Integrated Circuits*, Amsterdam: Elsevier, 1988.

[3] E. Seevinck, "Synthesis of nonlinear circuits based on the translinear principle", *Proceedings ISCAS*, 1983, pp. 370-373.

[4] B. Gilbert, "A new wide-band amplifier technique", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 3, pp. 353-365, 1968.

[5] B. Gilbert, "A precise four-quadrant multiplier with sub- nanosecond response", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 3, pp. 365-373, 1968.

[6] E. Seevinck, and G.H. Renkema, "A 4-quadrant cosine-synthesis circuit", *Proceedings ISSCC*, 1982, pp. 40-41.

[7] E. Seevinck, W. de Jager, and P. Buitendijk, "A low-distortion output stage with improved stability for monolithic power amplifiers", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 23, pp. 802-815, 1988.

[8] J.A. de Lima, "Design of a micropower CMOS four-quadrant multiplier based on the translinear principle", *Proceedings ESSCIRC*, 1989, pp. 260-263.

[9] K. Bult, and H. Wallinga, "A class of analog CMOS circuits based on the square-law characteristic of an MOS transistor in saturation", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 22, pp. 357-365, 1987.

[10] E. Seevinck, "Design and application of integrated analog interface circuits", *Proceedings ISCAS*, 1988, pp. 1923-1926.

[11] E. Seevinck, and R.J. Wiegerink, "Generalized translinear circuit principle", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 26, pp. 1098-1102, 1991.

[12] R.J. Wiegerink, *Analysis and Synthesis of MOS Translinear Circuits*, Kluwer, to be published, juli 1993.

[13] J.H. Botma, R.F. Wassenaar, and R.J. Wiegerink, "A low-voltage CMOS Op Amp with a rail-to-rail constant-gm input stage and a class-AB rail-to-rail output stage", *Proceedings ISCAS*, 1993.

[14] F.N.L. Op 't Eynde, P.F.M. Ampe, L. Verdeyen, W.M.C. Sansen, "A CMOS large-swing low-distortion three-stage class AB power amplifier", *IEEE J. Solid-State Circuits*, pp. 265-273, 1990.

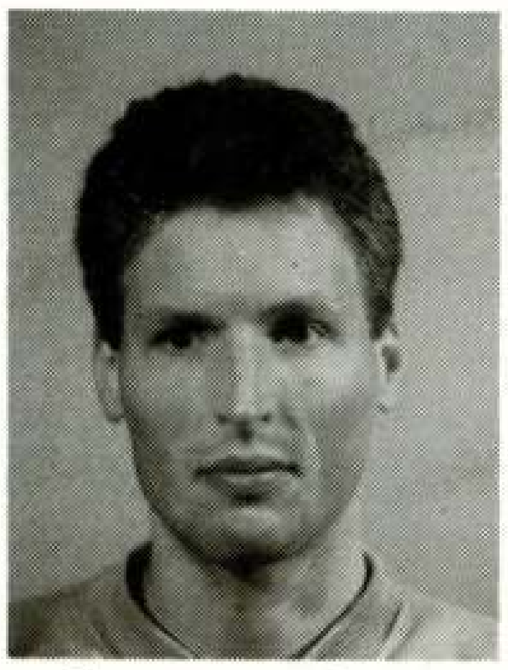
[15] M.D. Pardoen, M.G. Degrauwe, "A rail-to-rail input/output CMOS power amplifier", *IEEE J. Solid-State Circuits*, pp. 501-504, 1990.

[16] R. Hogervorst, R.J. Wiegerink, P.A.L. de Jong, J. Fonderie, R.F. Wassenaar, and J.H. Huijsing, "CMOS low-voltage operational amplifier with constant-gm rail-to-rail input stage", *Proceedings ISCAS*, 1992, pp. 2876-2879.

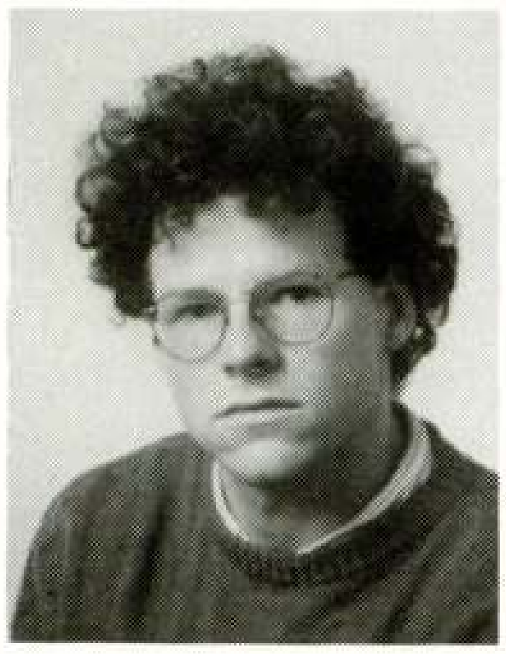
[17] E.A.M. Klumperink, *ACMA Design Manual*, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 1990.

Voordracht gehouden tijdens de 408e werkvergadering.

NEDERLANDS ELEKTRONICA- EN RADIOGENOOTSCHAP
408e werkvergadering



D. M. W. LEENAERTS



G. P. M. EGELMEERS

UITNODIGING voor de lezingenmiddag van het NERG op maandag 18 januari 1993 in de Collegezaal EH, gebouw E-hoog, faculteit Elektrotechniek van de Technische Universiteit Eindhoven, Den Dolech 2, Eindhoven.

THEMA: MODERN CIRCUIT- EN SYSTEEMONTWERP IN DE ELEKTRONICA DOOR MIDDEL VAN GESCHIKTE CAD-GEREEDSCHAPPEN

PROGRAMMA:

13.45 - 14.00 uur:	Ontvangst en koffie
14.00 - 14.45 uur:	Siliciumcompilatie voor gemengd analoog-digitaal ontwerp **DR. IR. D. M. W. LEENAERTS** Technische Universiteit Eindhoven
14.45 - 15.30 uur:	MOS translineaire schakelingen **DR. IR. R. J. WIEGERINK** Universiteit Twente
15.30 - 15.45 uur:	Thee
15.45 - 16.30 uur:	ESCAPE: een flexibel interactief ontwerpsysteem **IR. G. L. J. M. JANSSEN** Technische Universiteit Eindhoven
16.30 - 17.15 uur:	Adaptieve filtersystemen: complexiteit-performance optimalisatie **IR. G. P. M. EGELMEERS** Technische Universiteit Eindhoven
17.15 - 18.00 uur:	OCEAN: zelf semi-custom ontwerpen **DR. IR. P. R. GROENEVELD en IR. P. STRAVERS** Technische Universiteit Delft
18.00 uur:	Sluiting

Aanmelding voor deze dag dient te geschieden vóór 11 januari a.s. door middel van de aangehechte kaart, gefrankeerd met een postzegel van 60 cent.

Leden van NERG en studenten hebben gratis toegang. De kosten van deelname voor niet-leden bedragen *f* 15,00. Betalingen dienen vóór 11 januari te zijn ontvangen op girorekening 94746 t.n.v. Penningmeester NERG, Postbus 39, 2260 AA Leidschendam.

Namens het NERG,
Prof. dr. ir. W. M. G. van Bokhoven
Tel. 070 - 3325112(administratie NERG)

Eindhoven, december 1992.

ESCAPE: The Eindhoven Schematic Capture Environment

Ir. G.L.J.M. Janssen, Ir. J.W.G. Fleurkens
Eindhoven University of Technology
P.O. Box 513, 5600 MB Eindhoven

ESCAPE is a Computer-Aided Design tool that combines schematic diagram drawing facilities with interactive simulation. As such it may also be called an interactive graphical design-entry system. Typically, a user draws a picture of the circuit under design and can then immediately watch a simulation. The results of the simulation may be presented by means of animating the circuit's components and nets, e.g. by changing colours, or by annotating the components with numerical values or text strings. Recent developments extend the capabilities of the program with compiled behaviour simulation and interfaces to other programs such as high-level synthesis tools.

1. Introduction

Historically, one of first steps in the design of an integrated circuit consisted of specifying a network of interconnected primitive modules in some hardware description language. To date, over 800 different languages have been defined, most of them proprietary products of the computer and electronics industry. Only a few languages have gained wide-spread use, among the most popular ones are VHDL, Verilog and HardwareC. In general, such languages exhibit two main aspects: (1) the description of the structure of the circuit and (2) the semantics of the constituting circuit components. Often, this may be done in a hierarchical fashion, i.e. a component can itself be an interconnection of sub-components. Many designers will find a graphical approach more natural. Instead of summing up all components and their connections in a text file, one would like to simply draw the circuit on the screen. The connection information is then left implicit in the drawing. Programs that create a circuit description in this way are called schematic editors.

In 1986, as part of the Dutch government funded ICD/Nelsis project, our group in Eindhoven started developing its own schematic editor tailored towards applications for a piecewise-linear simulator [1]. Thus the program Escher was born, its name chosen as a tribute to the Dutch artist M.C. Escher. However, with Escher, simulation still proceeds in a batch-like fashion: first you define the circuit and then you start the simulator which after a while will produce tables of output values that may be interpreted again and shown as graphic waveforms. This process is similar to the *edit-compile-run-debug* sequence in program development. Particularly in new designs a quick turn-around time in circuit validation is mandatory. In software engineering this problem is attacked by introducing interpreted languages and a special programming environment for them. One of the oldest (and still very much in use) interpreted language is Lisp [2]. Although nowadays excellent Lisp compilers exist that in terms of the efficiency and speed of produced code can compete with that of many procedural languages (e.g. C or Pascal), programmers tend to develop new programs in an interpretive mode. They write a few Lisp functions and test them immediately while in the editor. So why not apply this same methodology to hardware design: draw a piece of circuitry, attach some input stimuli and see what happens. The verb "see" in the last sentence should be taken literally: a good schematic editor should have so called back-annotation capabilities that allow for inserting simulation results directly in the drawing of the circuit. The ideas sketched above have been realised in a program named Escher$^+$ [3, 4]. ESCAPE [5] is the successor of Escher$^+$ and uses state-of-the-art graphics through X Windows and OSF/Motif. This particularly eases the customisation of the user-interface: a very important aspect in interactive computer programs.

The next section explains the look and feel of ESCAPE in terms of some illustrative examples. We assume that most readers are familiar with the basic commands found in any schematic editor program: manipulating certain objects by creating, moving, copying, and deleting them. Of course all these and many others are available in ESCAPE. Section 3 briefly discusses the internal data structures that are maintained by ESCAPE and presents the simulation model. Section 4 gives an overview of the behaviour language used to define the primitive circuit components.

2. ESCAPE at work

In ESCAPE a circuit is defined as a hierarchical network of interconnected instances of components. This is achieved in two steps:

1. Define a component by drawing a representation for it (a graphical symbol) and implicitly define its interface in terms of terminal ports. ESCAPE supports the notion of directed ports: a component can have input ports, output ports and bidirectional (inout) ports.

2. Define a network by instantiating components, so called instances, and connect their terminal ports by means of wires.

A network becomes hierarchical when one defines a representation for a network and then uses an instance of this composite component in a higher level network. The ESCAPE simulator is able to handle a hierarchical circuit. In fact, selected instances in a network under simulation may be expanded in another window and the simulation results pertaining to the sub-network will be visible in that window, see figure 1.

A behaviour description defines the computations that a component carries out given the values that are fed to its inputs. The results will be assigned to the outputs. Note that we require a behaviour description to be attached to each component, not to an instance. Currently, the data type of all values in ESCAPE is a subset of the integer numbers. In the future we foresee a much broader spectrum of built-in data types and also user-defined ones.

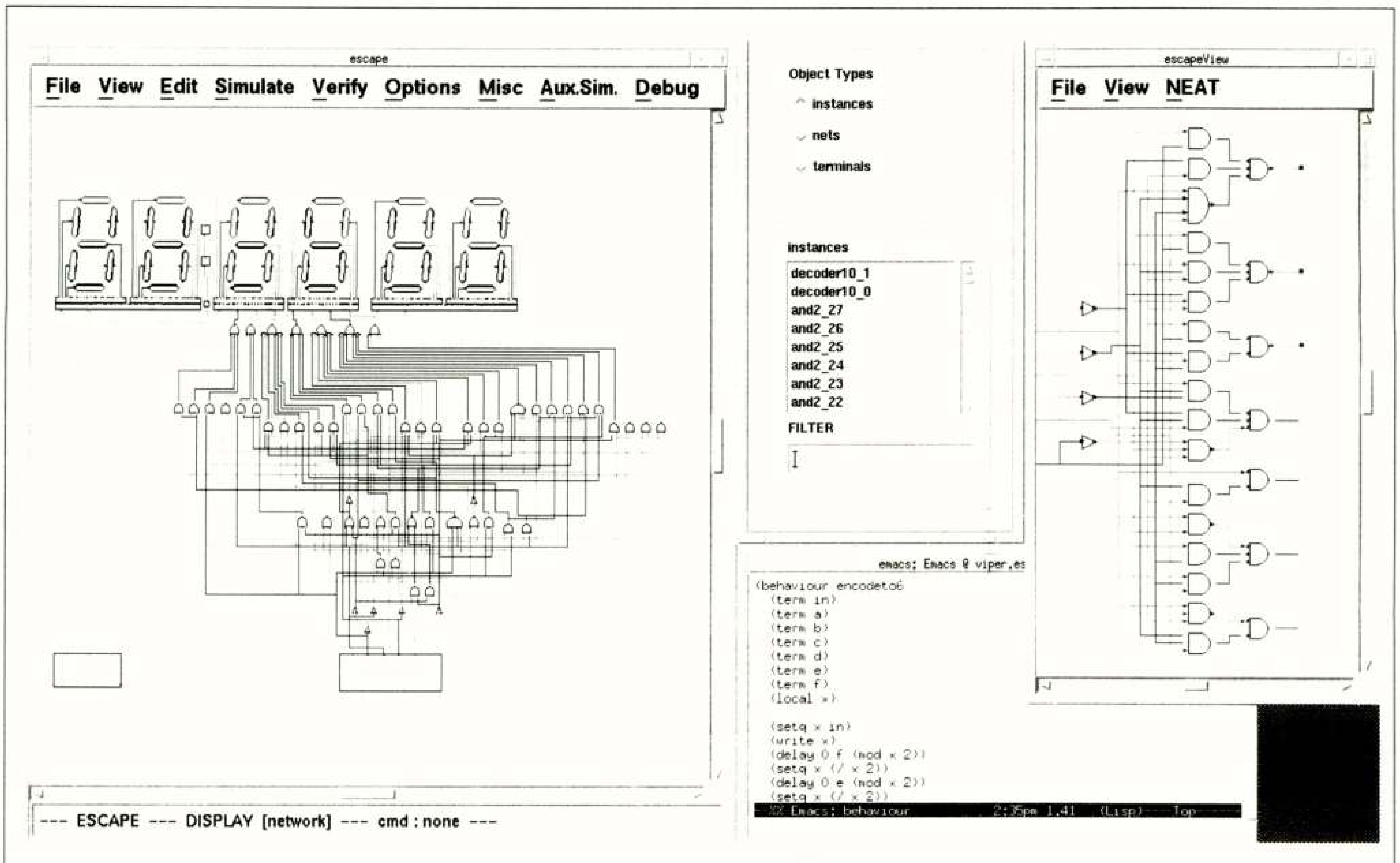


Figure 1: Snapshot of the screen during an ESCAPE *simulation of a digital clock (left window). The 7-segment decoder of the most right digit is simulated hierarchically and shown in a separate window on the right. Also shown is the object selection window and part of the behaviour description of a component.*

So here is the scenario of actions in ESCAPE that ultimately allow one to simulate a circuit:

1. Define all necessary components: draw their representations and prepare text files containing their behaviour. This step might be skipped when a library of the necessary components already exists.
2. Draw the network using instances of the defined components and connecting them with wires.
3. Use stimuli generator components from a libarary, or define them yourself.
4. Start the simulation, and if necessary supply some more input values by hand. The simulator runs a prescribed number of cycles, or till interrupted, or till some particular event occurs, or you may switch to single-step mode.

3. Simulation Model

The simulation algorithm is based on the notion of events. Unlike simulators for digital circuits our simulator calculates with integer values and makes a distinction between certain event types. This to support efficient simulation at a high abstraction level. ESCAPE lets a user define the behaviour of the basic blocks in a restricted subset of Lisp with some additional built-in primitives typical for our application.

Events and time

An event is a change of value of a net to be effectuated at a certain point in simulation time. Our simulation time progresses in discrete steps starting at the reference time point 0. During simulation, events will be created as a side-effect of the evaluation of instances of components in the network. With evaluation we mean the execution of the behaviour description associated with the instance. It should be obvious that simulation is an interwoven process of processing and creating events (see the algorithm of figure 2).

```
intialise;
{ Now the initial state of the network is determined. }

repeat
  { 1: Preprocess nets of concern: }
  for each event of current simulation time do
    case type of event of
    normal:
      if event causes change of net value then
        net value := event value
      else
        { Avoid further processing: }
        event type := cancelled;
    trigger, refrain:
      net value := event value;
    otherwise { no action }
    end;

  { 2: Evaluate instances of concern: }
  for each event of current simulation time do
    case type of event of
    normal, trigger:
      for each affected instance do
        execute instance's behaviour;
    otherwise { no action }
    end;

  { Here a new state of the network is determined. }
  increment simulatation clock;
until stop criterion satisfied;
```

Figure 2: Event-driven simulation algorithm.

Creation and scheduling of events

An event is created as a side-effect of the execution of the `delay` statement:

(delay <after> <outport> <value> | <kind> |)

Its effect is to add to the event administration the fact that to the net connected to the output port <outport> a certain <value> has to be assigned <after> time steps later than the current simulation time. Optionally, one could indicate the type of event with <kind> that controls the actions involved in processing this event.

Processing of events

At each simulation time point there are zero or more events to process. Processing of events entails considering the events scheduled for the current time point one by one and depending on their type updating the signal values carried by the nets and invoking the evaluation of instances connected to those nets. The latter two actions are performed strictly separated: first all the nets indicated by the events are set to their to-be-assigned values and afterwards the events are examined once more to determine which connected instances have to be evaluated. This ensures that during the evaluation of an instance the instance 'sees' all the correct net values at its ports for that particular time point. The events types control the exact nature of the second processing action.

Instance evaluation

The behaviour of an instance is determined by a user-written program in the behaviour description language. The program is associated with a component. Each instance will have its own local copy of the defined variables: thus the executable statements of the program need not be copied and will reside in the component data structure. Here is how the evaluation of an instance proceeds:

```
procedure evaluate (instance);
begin
  if instance is not yet evaluated then begin
    { Set up environment for interpretation: }
    current-instance := instance;
    interpret the behaviour statements;
    indicate that the instance is now evaluated;
  end;
end;
```

Figure 3: Evaluation of an instance.

Obviously, we make sure the instance is only evaluated once for this time point, and if it is the first time, the interpreter is called to execute the behaviour statements in the proper environment. The interpreter initialises the instance's local variables and executes the statements.

Initialisation

Initial events can be set up in a variety of ways. We chose an initialisation method that closely mimics the switching on of power to the circuit. Since, physically speaking, an electric network is continuously active, we initialise the network by evaluating all instances once before event processing starts. Again the order in which this takes place may not be relied upon. A designer can in this way make sure that state variables are initialised to some determinate values. We initially assume that all nets have value 0.

4. The Behaviour Description Language

The behaviour of a module is expressed in a Lisp-like programming language. This choice was primarily made for ease of parsing and interpretation. A description consists of two parts: an introductory part declaring the ports, state and local variables, and the actional part consisting of statements (executable forms in Lisp terminology). An

<behaviour-description> ::=
  '(' 'behaviour' <template-name> [<doc-string>]
    <declaration-part>
    <body>
  ')'.

<declaration-part> ::=
  { '(' 'term' <port-name> [<bus-width>] ')' }
  { '(' 'state' <state-name> [<init-value>] ')' }
  { '(' 'local' <local-name> [<init-value>] ')' }.

<body> ::= { <form> }.

<form> ::= "Executable Lisp expression, see table 1.".

Figure 4: Behaviour language syntax.

overview of the syntax is presented in figure 4. Input ports are to be regarded as read-only variables, through them the value of the associated net is obtained. Output ports may only appear in **delay** statements, which schedule events for the associated net. State variables hold their values over time and are initialised once at the start of a simulation run, whereas local variables are initialised every time the module's behaviour is executed. The statements are used to define a mapping from the module's input port values to its output port values. It is required that the evaluation of a module's behaviour terminates in all circumstances.

An example of a purely functional behaviour description is a conversion function from 4 bit signals to an unsigned integer:

```
(behaviour convert
  (term in3) (term in2) (term in1) (term in0)
  (term out)
  ;; converted value immediately (delay=0) appears
  ;; on output "out":
  (delay 0 out (+ (* 8 in3) (* 4 in2) (* 2 in1) in0)))
```

Dynamic behaviour is achieved by introducing state variables. This allows for describing finite state machines, e.g. a parity checker:

```
(behaviour parity
  (term data)
  (term clock)
  (term out)
  (state s 0) ; 0 means even number of ones seen,
              ; 1 means odd number

  (if (and data clock)
      (setq state (not state)))
  (delay 0 out state))
```

Explicit time dependent behaviour is achieved by delaying assignments to output ports, i.e. we use a **delay** statement with positive delay time argument. The example of a NAND gate illustrates this:

```
(behaviour nand
  (term in1)
  (term in2)
  (term out)

  (delay 3 out (not (and in1 in2))))
```

A cell of the board in "Conway's game of Life" [6] is taken as a last larger example. Note the use of the fourth optional argument in the **delay** statement to specify the type of event to be scheduled. The purpose of using refrain events here is to avoid an unnecessary amount of time spent in evaluating neighbour cells' behaviour descriptions. This is correct because we have a global clock. The complete board as simulated

with **ESCAPE** is depicted in figure 5.

```
(behaviour life_cell
  "Conway's game of life. description of 1 cell."
  (term nw_in nw_out no_in no_out ne_in ne_out
        ea_in ea_out se_in se_out so_in so_out
        sw_in sw_out we_in we_out)
  (term init)      ;used to set state of cell initially
  (term clock)     ;global control
  (state alive 0) ;holds state of cell: alive or death
  (local count)    ;counts number of living neighbours

  (if (= (simtime) 0)
      (setq alive init))

  (color alive)    ;color cell according state
  (if clock
      (progn       ;determine new state of cell
       (setq count (+ nw_in no_in ne_in ea_in
                      se_in so_in sw_in we_in))
       (setq alive (or (= count 3)
                       (and alive (= count 2)))))
   ;; else, inform neighbours of this cell's state:
   (delay 0 nw_out alive refrain)
   (delay 0 no_out alive refrain)
   (delay 0 ne_out alive refrain)
   (delay 0 ea_out alive refrain)
   (delay 0 se_out alive refrain)
   (delay 0 so_out alive refrain)
   (delay 0 sw_out alive refrain)
   (delay 0 we_out alive refrain)))
```

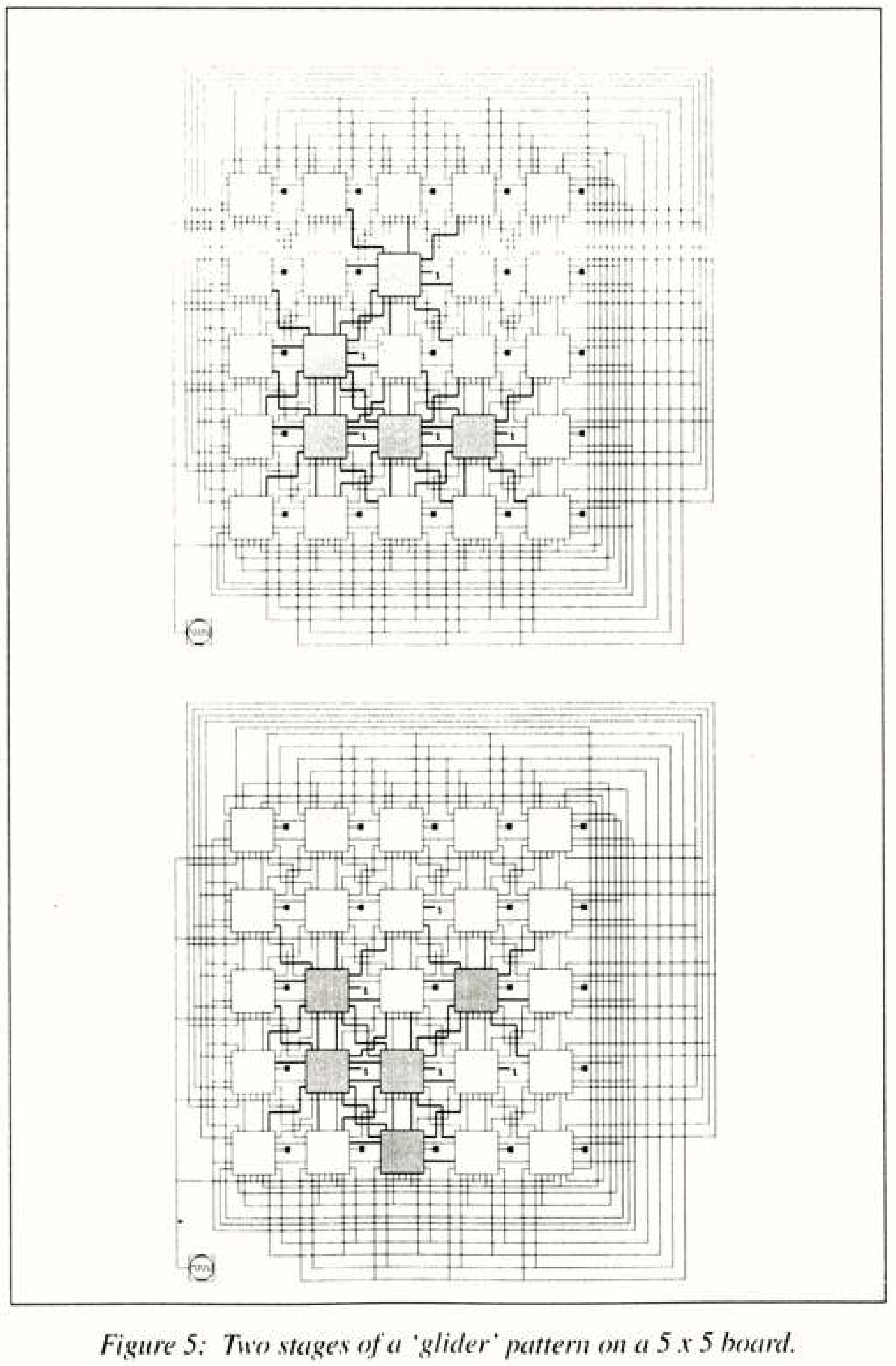


Figure 5: Two stages of a 'glider' pattern on a 5 x 5 board.

Table 1 shows a brief and incomplete overview of the primitive functions available in the **ESCAPE** behaviour modelling language.

Class	Operators/Key Words
Arithmetic	+, -, *, /, mod, min, max, random
Relational	<, <=, =, >, >=
Logical	not, and, or, eqv
Special forms	setq, delay if, while, progn
Output	write, color
Bitvector	make-bitvector bit, setbit, <<, >> (shift)

Table 1: Built-in functions.

5. Conclusions

The concept of tightly coupling a simulator with a schematic editor is the main novel feature of **ESCAPE**. It offers some remarkable possibilities as have been clearly demonstrated by the examples. But this concept can even be broadened much further: many other design tools can profit from a graphical interface, at least as seen from the designer's point of view. Recently, **ESCAPE** has been used to display and simulate the data-flow graphs that are used to represent a design during high-level synthesis.

References

[1] Lodder, A., Stiphout, M.T. van, and Eijndhoven, J.T.J. van, "ESCHER: Eindhoven SCHematic EditoR Reference Manual," *Eindhoven University Research Report 86-E-157*, February 1986.

[2] McCarthy, John, "History of Lisp," in *ACM SIGPLAN Notices*, vol. 13, pp. 217-223, August 1978.

[3] Steen, H.L.J. van der, "Interactive Event-driven Simulation," *Master thesis, Eindhoven University of Technology, Dept. Electrical Engineering*, August 1987.

[4] Janssen, G.L.J.M., "Circuit Modelling and Animated Interactive Simulation in Escher+," in *Proceedings SCS European Simulation Multiconference, Simulation applied to manufactoring, energy and environmental studies and electronics and computer engineering*, ed. S.Tucci, A. Mathis, W. Hahn, R.N. Zobel, pp. 265-270, Rome, 7-9 June, 1989.

[5] Fleurkens, H., "Interactive System Design in ESCAPE," in *Proceedings IEEE Int. Workshop on Rapid System Prototyping*, Research Triangle Park, N.C., June 28-30, 1993 (to appear).

[6] Jones, Geraint, "Conway's game of Life," *Programming in occam*, pp. 82-98, Prentice-Hall International, 1987.

Voordracht gehouden tijdens de 408e werkvergadering.

Adaptive Filtersystems: COMPLEXITY-PERFORMANCE OPTIMALISATION

Ir. G.P.M. Egelmeers
Eindhoven University of Technology (TUE)

In adaptive filtering much attention is directed towards algorithms that have both good performance and low complexity. As the Least Mean Square (LMS) algorithm lacks both, alternatives have to be found. In time domain fast algorithms have been introduced, based on Recursive Least Squares adaptive filtering, with higher performance but also higher complexity. A switch to frequency domain yields algorithms that have better performance and a much lower computational complexity than LMS, at cost of a processing delay.

In the Block Frequency Domain Adaptive Filter (BFDAF) this processing delay can grow quite large for reasonable complexity. A solution to this problem is found by partitioning the adaptive filter impulse response, yielding the Partitioned BFDAF (PBFDAF). Complexity can be reduced by using two different partition factors in the Decoupled PBFDAF (DPBFDAF).

Another method to reduce complexity at cost of a (small) delay is obtained by using filter banks instead of Fourier transforms. In this case however, processing delay grows quite large for reasonable complexity.

If an algorithm with low delay, low complexity and good performance is considered as ideal, the frequency domain approach resulting in the DPBFDAF algorithm is a good choice.

1. Introduction

In recent years, much attention in adaptive filtering has been focussed on applications requiring filters with long impulse responses. In acoustic echo cancellation for example, it is not uncommon that thousands of Finite Impulse Response (FIR) coefficients are needed to achieve the desired level of performance. This level of performance is thereby strongly influenced by the statistical properties of the adaptive filter input signals. The combination of removing this influence and the long impulse responses imposes a huge computational complexity on the adaptive filter. Starting from the well known Least Mean Square (LMS) [1] algorithm, different adaptive filtering algorithms will be explained here.

To avoid the often very bad convergence behaviour of the LMS algorithm caused by the statistical properties of the adaptive filter input signals, these signals can be decorrelated in time domain in the Recursive Least Squares (RLS) [2,3] algorithm. Using this RLS algorithm, the order of decorrelation equals the adaptive filter order, resulting in a large complexity. To reduce complexity, the decorrelation order can be made independend of the adaptive filter order using the Block Orthogonal Projection (BOP) [4,5,6,7] algorithm.

Another method to increase performance and reduce complexity is to perform the filter operations in frequency domain, resulting in the Block Frequency Domain Adaptive Filter (BFDAF) [8,9,10,11]. To reach an acceptable complexity using this algorithm, the processing delay of the filter will grow to an often unacceptable level.

By partitioning the filter into smaller parts and using a smaller transformation to frequency domain, this delay can be kept to an acceptable level in Partitioned BFDAF (PBFDAF) [12,13,14,15]. Decorrelation properties however, are dependent of the delay and can therefore decrease to much.

By choosing a different partition factor in the filter and decorrelation part of the algorithm, delay and decorrelation dimension can be decoupled in Decoupled PBFDAF (DPBFDAF) [16].

A third group of methods is based on a transformation of the filter using filter banks [17,18,19,20,21].

The signal estimation scheme, as depicted in figure 1, is used as a vehicle to describe the algorithms. The "unknown" system H has to be imitated by the adaptive filter W. Passing the signal $x[k]$ through the system H yields the signal $e[k]$ to be estimated. This signal is corrupted by a signal $s[k]$, uncorrelated with $x[k]$, resulting in the measurable signal $\tilde{e}[k]$. The adaptive filter has to make a replica $\hat{e}[k]$ of $e[k]$. Theoretically the residual signal $r[k] = \tilde{e}[k]-\hat{e}[k]$ in steady state will become equal (in average) to the signal $s[k]$.

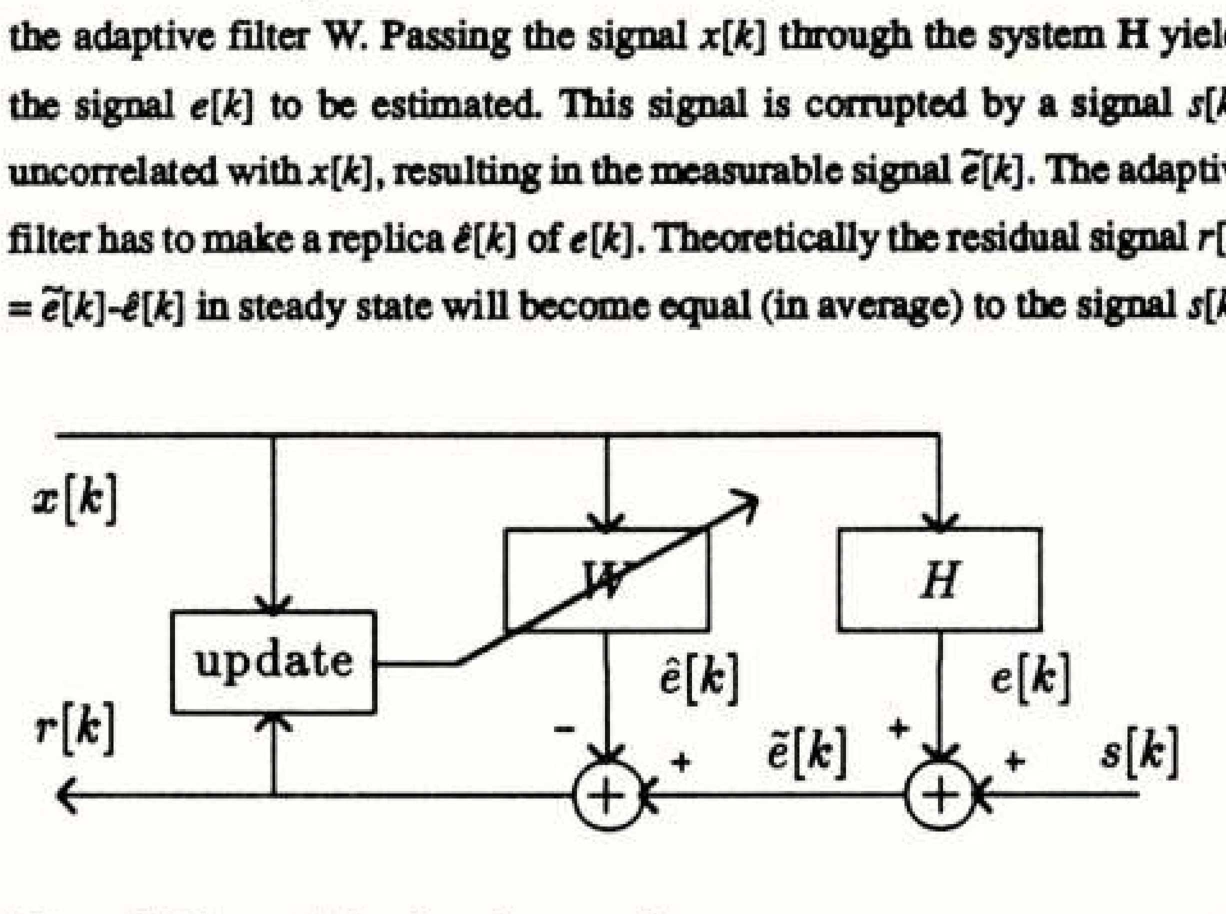


Figure 1: General signal estimator scheme.

From now on it is assumed that all signals are discrete in time, having an intersample distance of T seconds, and furthermore that the unknown system H and the adaptive filter W can be modelled by a transversal filter with N coefficients:

$$\underline{h} = (h_{N-1} \dots h_0)^T \tag{1}$$

$$\underline{w}[k] = (w_{N-1}[k] \dots w_0[k])^T \tag{2}$$

with $(\cdot)^T$ denoting the transpose. The difference vector $\underline{d}[k]$ is defined as $\underline{d}[k]=\underline{h}-\underline{w}[k]$. If the input vector of the filter containing the last N input samples is defined as:

$$\underline{x}[k] = (x[k-N+1] \dots x[k])^T \tag{3}$$

then the residual signal can be described as:

$$r[k] = \underline{x}^T[k]\cdot\underline{d}[k] + s[k] \tag{4}$$

2. Normalized Least Mean Square

The Least Mean Square (LMS) algorithm adapts in average to the optimal (Wiener) solution by minimizing the mean squared error $E\{r^2[k]\}$ of the residual signal [1]. This is done by calculating the gradient $E\{r^2[k]\}$ with respect to the vector $\underline{w}[k]$, yielding $\underline{\nabla}[k]=-2E\{\underline{x}[k]r[k]\}$. By using a steepest-descent method ($\underline{w}[k+1]=\underline{w}[k]-\alpha\underline{\nabla}[k]$) and approximating the gradient by $-2\underline{x}[k]r[k]$ yields the LMS update equation, given by:

$$\underline{w}[k+1] = \underline{w}[k] + 2\alpha\cdot\underline{x}[k]\cdot r[k] \tag{5}$$

As the dynamic behavior of this update equation depends on $E\{\underline{x}^2[k]\}=\sigma_x^2[k]$, the equation is normalized, resulting in the Normalized LMS (NLMS) algorithm:

$$\underline{w}[k+1] = \underline{w}[k] + \frac{2\alpha}{\sigma_x^2[k]}\cdot\underline{x}[k]\cdot r[k] \tag{6}$$

The advantages of the NLMS algorithm are its simplicity of structure, its low delay (one sample interval), its low storage requirements and its relative ease with which it can be mathematically analyzed. Its main disadvantage is its often very bad performance when strongly coloured input signals (input signals with a lot of intersample correlation) are used. Its computational complexity (its number of real multiplications per sample) equals $2N$.

3. Decorrelation in time domain

3.1 Recursive Least Squares

To remove the dependency of the input signal statistics the LMS adaptive algorithm can be modified. The next observation can be made:

$$\begin{aligned} E\{\underline{x}[k]\cdot r[k]\} &= E\{\underline{x}[k]\cdot\underline{x}^T[k]\cdot\underline{d}[k]\} \\ &\approx E\{\underline{x}[k]\cdot\underline{x}^T[k]\}\cdot E\{\underline{d}[k]\} \\ &= \boldsymbol{R}_{xx}[k]\cdot E\{\underline{d}[k]\} \end{aligned} \tag{7}$$

In this equation the dependency of the update algorithm on the input signal statistics (the input signal autocorrelation matrix $\boldsymbol{R}_{xx}[k]$) is shown. To remove this dependency the Recursive Least Squares (RLS) update equation can be used:

$$\underline{w}[k+1] = \underline{w}[k] + 2\alpha\boldsymbol{R}_{xx}^{-1}[k]\cdot\underline{x}[k]\cdot r[k] \tag{8}$$

This equation will never be used in practice because of the matrix inversion involved. However by establishing a direct estimate of the inverse autocorrelation matrix, computationally more attractive algorithms can be obtained. The Stabilized Fast Transversal Filter [3], for example, has a number of multiplications per sample of approximately $8N$.

The main advantages of the RLS algorithm are that its convergence properties are almost independent of the input signal statistics and that its delay is very low (one sample interval). The main disadvantage is its large computational complexity, which makes it (still?) not usable in many practical "real time" applications (e.g. acoustic echo cancellation).

3.2 Block Orthogonal Projection

Before deriving an algorithm that decouples the decorrelation dimension and the filter length in time domain, first the NLMS algorithm is reconsidered. In figure 2 a geometrical interpretation of the NLMS algorithm is given. The update procedure performs a decomposition of the difference

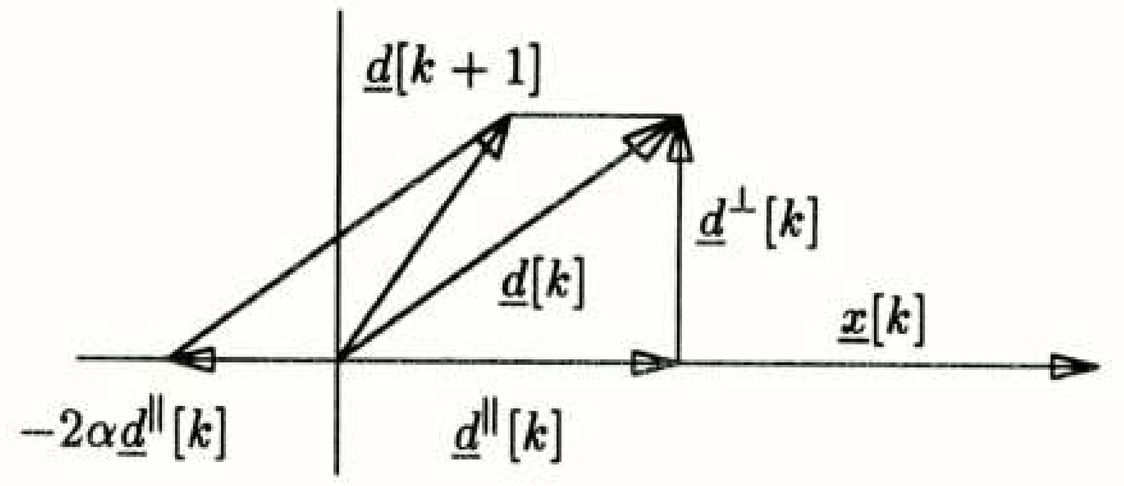


Figure 2: Geometric interpretation of NLMS.

vector $\underline{d}[k]$ in a parallel part $\underline{d}^{\|}[k]=\underline{x}[k]\cdot c[k]$ and an orthogonal part $\underline{d}^{\perp}[k]$ with respect to $\underline{x}[k]$. For simplicity it is assumed that $s[k]$ equals zero. As $r[k]=\underline{x}^T[k]\cdot\underline{d}[k]=\underline{x}^T[k]\cdot\underline{x}[k]\cdot c[k]=c[k]\cdot\sigma_x^2[k]$, it can be deducted that $\underline{x}[k]\cdot r[k]/\sigma_x^2[k]=\underline{d}^{\|}[k]$. The NLMS update formula therefore just consists of substracting $2\alpha\underline{d}^{\|}[k]$ from $\underline{d}[k]$. This means both a reduction in length of $\underline{d}[k]$ and a rotation such that it becomes "more orthogonal" to $\underline{x}[k]$. If however there is correlation between the vector $\underline{x}[k]$ and its past (the vectors $\underline{x}[k-i]$ for $i>0$) the successive updates will not be orthogonal and can thus counteract each other, which explains for the often bad convergence properties of the NLMS algorithm while using a coloured input signal.

To diminish this dependency the projection can be extended to a projection on a B-dimensional hyperplane spanned by the last B input vectors as depicted in figure 3. By performing B updates at a time this yields

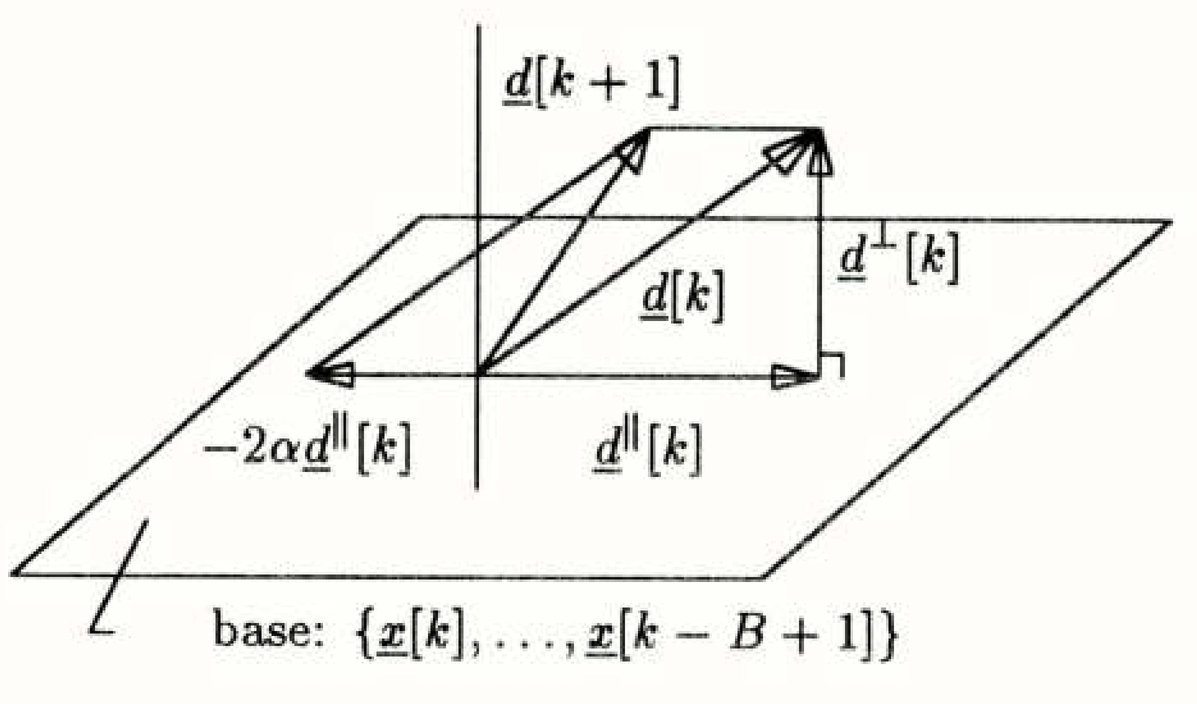


Figure 3: Geometric interpretation of BOP.

the Block Orthogonal Projection algorithm [5]:

$$\underline{w}[(k+1)B] = \underline{w}[kB] + 2\alpha\boldsymbol{X}[kB]\cdot\left(\frac{1}{B}\boldsymbol{X}^T[kB]\cdot\boldsymbol{X}[kB]\right)^{-1}\cdot\underline{r}[kB] \tag{9}$$

The matrix $\boldsymbol{X}[kB]=(\ \underline{x}[kB-B+1]\ \ldots\ \underline{x}[kB]\ )$ contains the B most recent input vectors and the vector $\underline{r}[kB]=(\ r[kB-B+1]\ \ldots\ r[kB]\ )^T$ contains the last B residual signals. The matrix $(1/B)\cdot(\boldsymbol{X}^T[kB]\cdot\boldsymbol{X}[kB])$ can be approximated by the BxB autocorrelation matrix $\boldsymbol{R}_{xx}[kB]$. If B equals N this results in a RLS-like algorithm on block bases (performing N updates at a time). Like in the RLS case also here computational complexity can be reduced by using a direct estimate of the inverse autocorrelation matrix. The Fast Newton Transversal Filter [6,7], for example, can achieve $12B+2N$ real multiplication per sample.

The main advantage of this algorithm (compared to RLS) is its possibility to reduce the decorrelation dimension and thus the computational complexity independent of the filter length N. The main disadvantage is that the computational complexity still is quite large.

4. Frequency domain algorithms

4.1 Block Frequency Domain Adaptive Filter (BFDAF)

By performing adaptive filter operations in frequency domain computational complexity can be reduced while also decorrelation is performed. Basically, an adaptive filter consists of convolutions. By using block processing techniques, these convolutions can be implemented efficiently by using the Discrete Fourier Transform (DFT) or (more efficiently) the Fast Fourier Transforms (FFT). The filter part of a general adaptive algorithm can be described on block basis as follows:

$$\hat{\underline{e}}[kB] = \boldsymbol{X}^T[kB]\cdot\underline{w}[kB] \qquad (10)$$

By using the overlap save method this equation can be transformed to frequency domain using FFT's with length at least as large as the sum of the block-length and the filter length [8,9,10,11]. By also transforming a RLS like block update equation (performing B updates at a time), the Block Frequency Domain Adaptive Filter is obtained. This algorithm is depicted in figure 4. D denotes a one sample delay, that, in this case, equals $B\cdot T$ seconds. The following set of equations describes the PBFDAF algorithm:

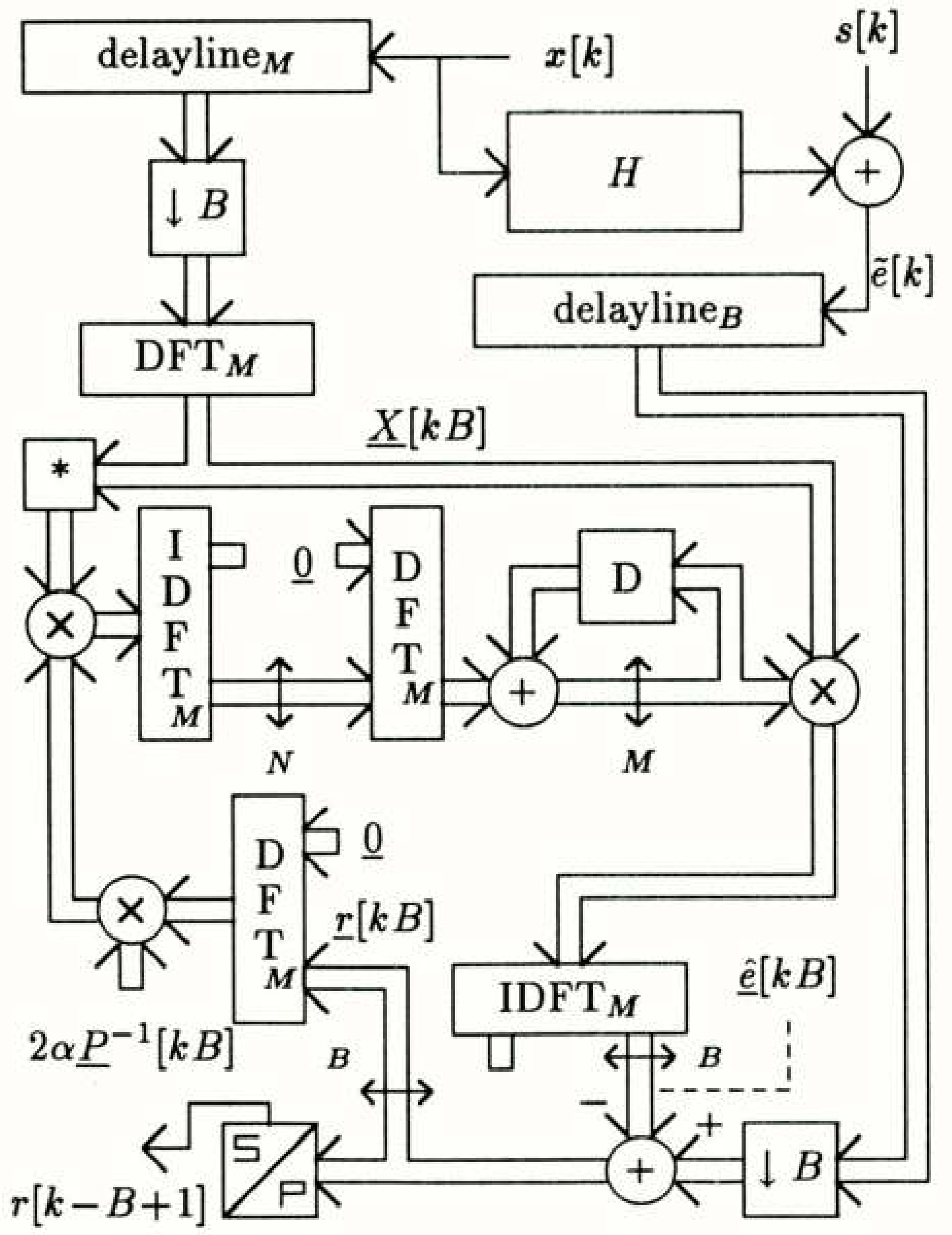


Figure 4: BFDAF diagram.

$$\hat{\underline{e}}[kB] = (\boldsymbol{0}\ \boldsymbol{I}_B)\cdot\boldsymbol{F}_M^{-1}\cdot(\underline{X}[kB]\otimes\underline{W}[kB]) \qquad (11)$$

$$\underline{W}[(k+1)B] = \underline{W}[kB] + 2\alpha\underline{X}^*[kB]\otimes\underline{P}^{-1}[kB]\otimes\left(\boldsymbol{F}_M\begin{pmatrix}\boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{I}_B\end{pmatrix}\cdot\underline{r}[kB]\right) \qquad (12)$$

with:

$$\underline{X}[kB] = \boldsymbol{F}_M\cdot(x[kB-M+1]\ \ldots\ x[kB])^T \qquad (13)$$

$$\underline{P}[kB] = \frac{1}{M}\underline{X}^*[kB]\otimes\underline{X}[kB] \qquad (14)$$

The MxM Fourier matrix with (p,q)'th element $e^{-2\pi pq/M}$ is denoted by $\boldsymbol{F}_M$ and $\otimes$ denotes the elementwise multiplication of two vectors (yielding a vector). The i'th element $(\underline{P}^{-1}[kB])_i$ of the vector $\underline{P}^{-1}[kB]$ equals $((\underline{P}[kB])_i)^{-1}$. $\boldsymbol{0}$ is a matrix containing all zeros having the appropriate dimension. The main advantages of the BFDAF algorithm are its good decorrelation properties (comparable to RLS) and its very low complexity for large block sizes, about $2M/B\cdot\log_2(M)$ real multiplications per sample (If $B=N$, this implies $M\approx 2B$, complexity equals $4\cdot\log_2(2N)$). The main disadvantage is the large processing delay (equal to the block size) for reasonable complexity. This disadvantage gave rise to a new algorithm, the Partitioned BFDAF (PBFDAF) algorithm.

4.2 Partitioned BFDAF (PBFDAF)

In Partitioned Block Frequency Domain Adaptive Filtering (PBFDAF) [12,13,14,15] the block length is reduced by partitioning the filter impulse response in N/Q parts of length Q, so the convolution is now described by:

$$\hat{\underline{e}}[kB] = \sum_{i=0}^{N/Q-1}\boldsymbol{X}_i^T[kB]\cdot\underline{w}_i[kB] \qquad (15)$$

with:

$$\underline{w}[kB] = (\underline{w}^T_{N/Q-1}[kB]\ \ldots\ \underline{w}_0^T[kB])^T \qquad (16)$$

$$\boldsymbol{X}^T[kB] = (\boldsymbol{X}^T_{N/Q-1}[kB]\ \ldots\ \boldsymbol{X}_0^T[kB]) \qquad (17)$$

$$\boldsymbol{X}_i[kB] = \boldsymbol{X}_0[kB-iQ] \qquad (18)$$

By making Q an integer multiple of B ($q=Q/B$), and using a transformation to frequency domain of length M, with $M>B+Q-1$, a delayline can be used to realize the above efficiently (in frequency domain). By using the BOP algorithm as time domain update equation and transforming it to frequency domain [22], the PBFDAF algorithm is obtained.

The filter part of the algorithm, performing the sum of convolutions of equation 16, is depicted in figure 5. The actual update equation is performed

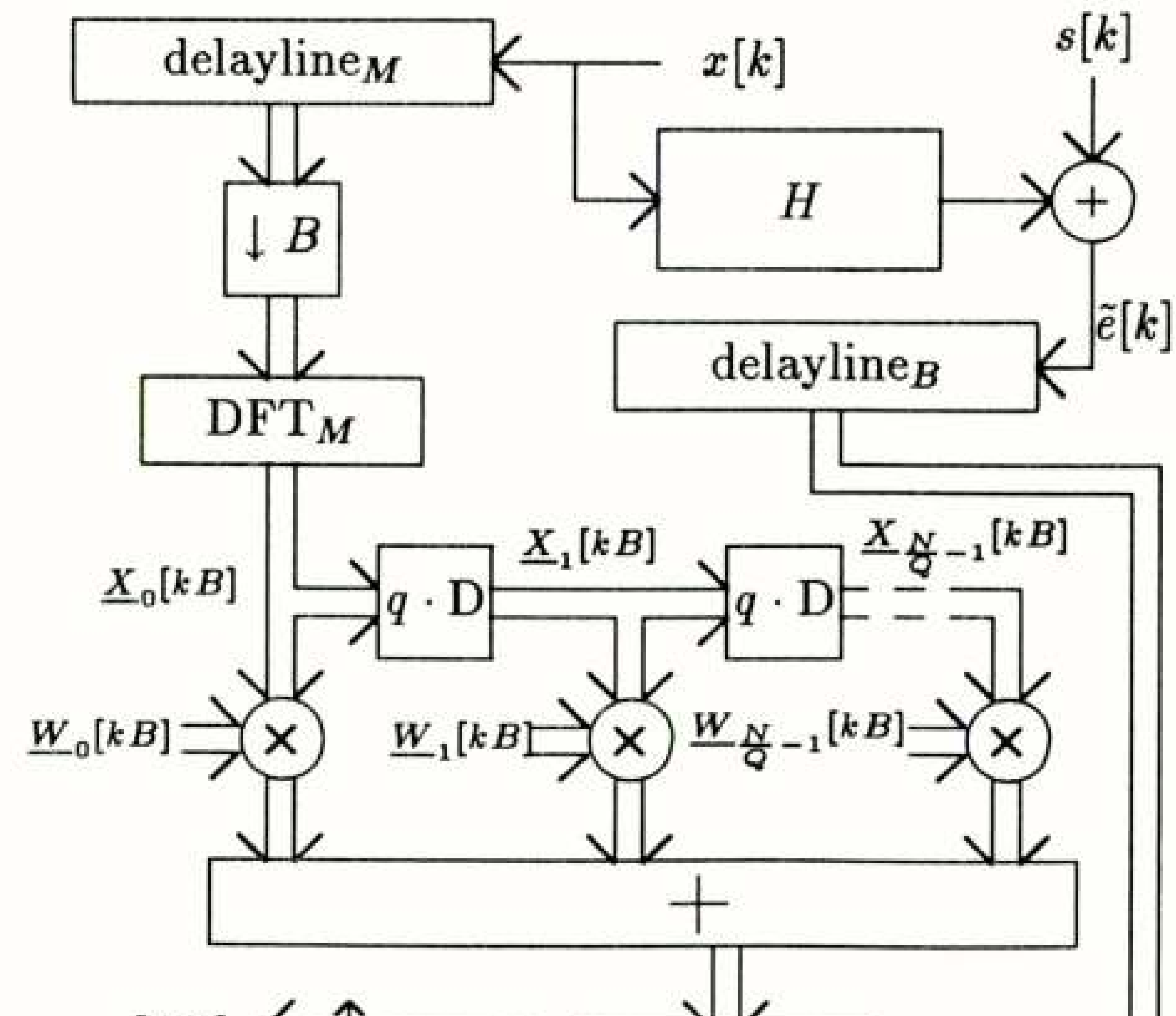


Figure 5: PBFDAF and DPBFDAF filter part.

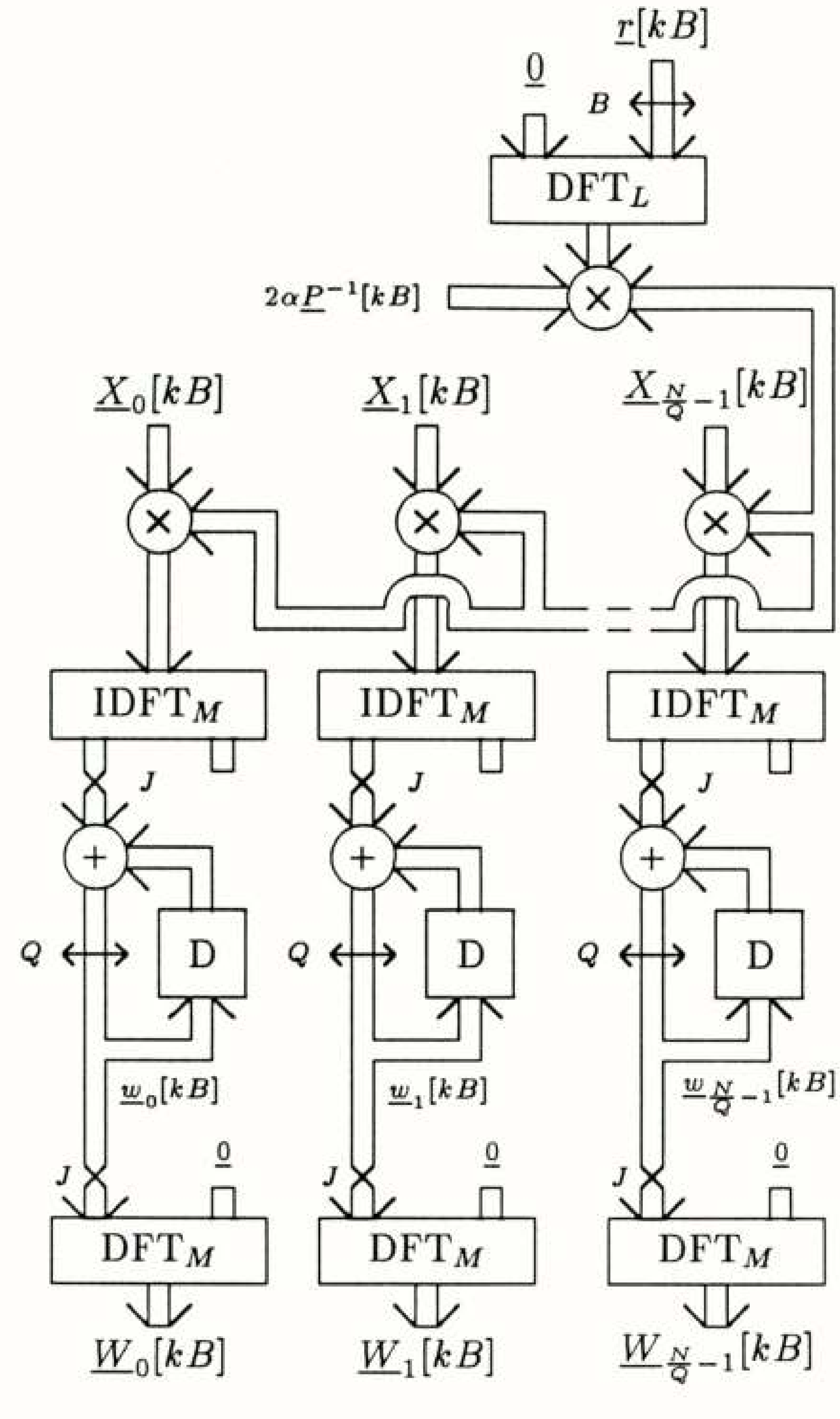


Figure 6: PBFDAF update part.

by the update part of figure 6. In these figures $q \cdot D$ denotes a cascade of q one sample delays D (a one sample delay delays here over $B{\cdot}T$ seconds). The mirror operations J of figure 6 (reversing the order of elements in a vector) can be omitted here (as they cancell each other) just like in the BFDAF algorithm. There presence is caused by the definition of the ordering of elements in the diverse vectors (the "convolution" mentioned above, in fact is a correlation, by reversing the order of elements of one of the vectors it becomes a convolution).

The main advantage of this algorithm (compared to BFDAF) is its possibility to choose the processing delay independent of the filter length, with a much smaller influence on the computational complexity. The processing delay however, must be choosen equal to the decorrelation length. A second disadvantage is the rather complex structure of the algorithm. Its computational complexity will be between that of the NLMS and of the BFDAF with $B{=}N$, depending on the partition factor N/Q. For small block lengths, the decorrelation dimension becomes very small, which may have a bad influence on the performance. Also complexity then increases towards the NLMS complexity. These two disadvantages call for a new algorithm, the Decoupled PBFDAF (DPBFDAF).

4.3 Decoupled PBFDAF (DPBFDAF)

For the Decoupled Partitioned Block Frequency Domain Adaptive Filter (DPBFDAF) [16] algorithm also the BOP time domain algorithm is transformed to frequency domain. However a different partition factor and block length are choosen for the filter and update part of the algorithm. The filter part of the algorithm with block length B, partition factor N/Q and transformation length M, equals the filter part of the above PBFDAF algorithm depicted in figure 5. The update part with block length A, partition factor N/Z and transformation length L, $L{>}A{+}Z{-}1$, however is somewhat more complex, as the input and output signals of this part have to be transformed to another block-length and rate (because of the difference in block-length and rate between the filter and update part of the algorithm). For simplicity it is assumed that this update part block length A is an integer multiple of the filter part block length B. The update part is depicted in figure 7. The one

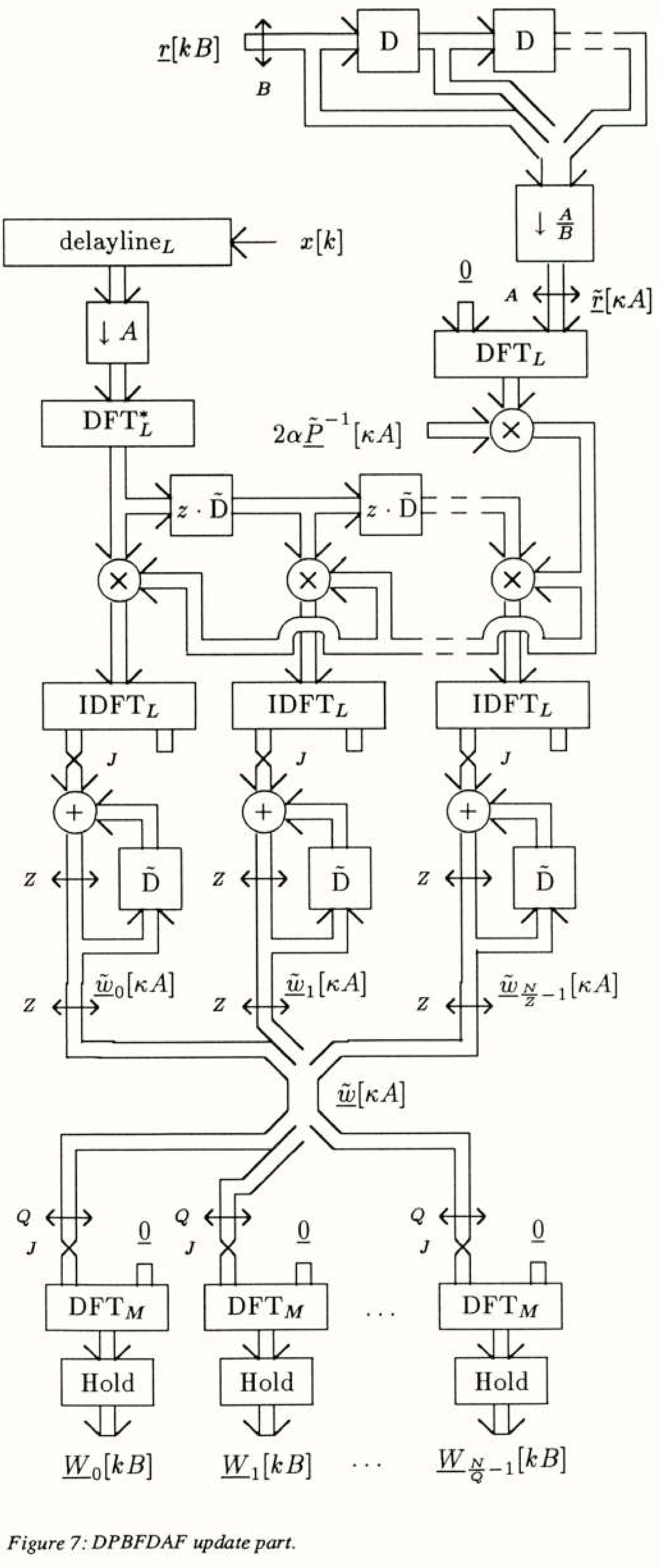


Figure 7: DPBFDAF update part.

sample delay $\tilde{D}$ now delays over $A.T$ seconds. In this case the mirror operation J cannot be omitted, as the coefficients vector is "repartitioned" (repartitioning the reverse vectors would lead to the wrong result). As the update sample part rate is lower than the filter part sample rate, the coefficients vector must be saved during A/B sample intervals (thus $A/B \cdot B \cdot T = A \cdot T$ seconds) in the box called "Hold" in figure 7.

If a DPBFDAF algorithm is compared to a PBFDAF algorithm with equal delay, decorrelation dimension can be much higher with a much lower computational complexity. This lower computational complexity is caused by the fact that the FFT's performing the transformations of the adaptive filter vector can be performed at a lower rate without influence on the processing delay of the adaptive filter.

5. Subband and Wavelett Adaptive Filtering

5.1 Subband Adaptive Filter (SAF)

The Discrete Fourier Transform used in the previous section can be interpreted as an analysis bank splitting the input signal in different frequency bands. As can be seen in figure 8, these bands are quite overlapping, which

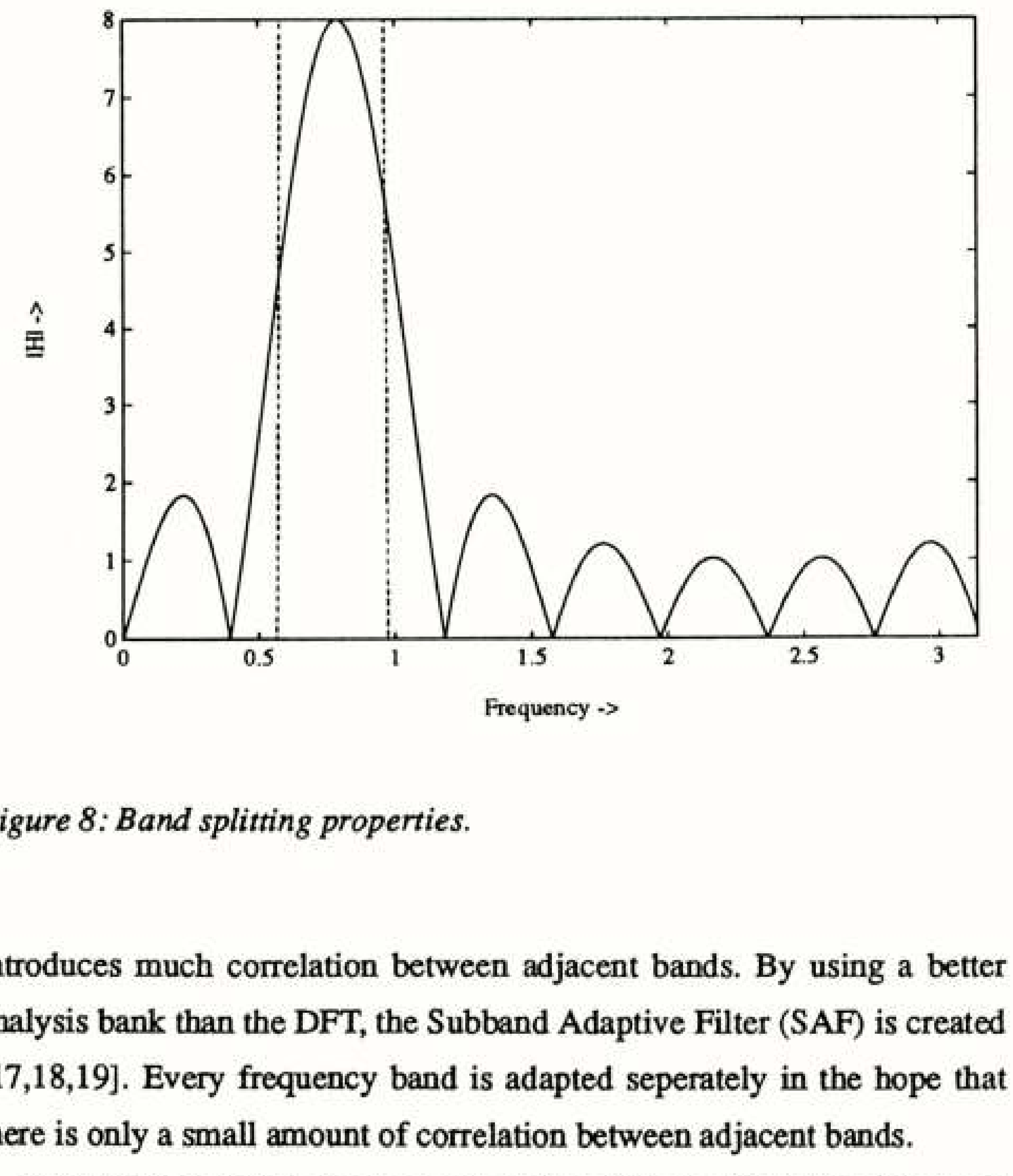


Figure 8: Band splitting properties.

introduces much correlation between adjacent bands. By using a better analysis bank than the DFT, the Subband Adaptive Filter (SAF) is created [17,18,19]. Every frequency band is adapted seperately in the hope that there is only a small amount of correlation between adjacent bands.

In order to obtain a good reconstruction of the residual signal through a synthesis bank, the amount of aliasing, and thus correlation between adjacent bands, must be minimized. This induces the use of long analysis and synthesis filters (several hundreds of coefficients).

Another problem is the impossibility for exact reconstruction of the unknown system using SAF's, the adaptive filter required has an infinite impulse response and will be non causal. By introducing an extra delay and introducing an extra error by neglecting the tail and the head of the impuls response a Finite Impulse Response filter can be used. As the decorrelation dimension equals the number of bands, and an increasing number of bands increases the processing delay (because of the delay in the analysis and synthesis bank), delay will get large (several hundreds of sample intervals) in most practical cases. Then, however, computational complexity is low, comparable to the DPBFDAF complexity (about $N/10$).

5.2 Wavelett transforms and Multiresolution in Adaptive Filtering

In SAF usually an (almost) uniform filter bank is used, but this is a rather arbitrary choice. In acoustic echo cancellation a multiresolution approach [20], for example, involving a tree structure of filter banks, offers many advantages. In this case, the signal is split in two bands, the lowest band is again split in two bands, and so on. This has the following advantages:

- perception: since the quality of echo suppression is judged by the human ear, which analyzes sounds with a filter bank that is uniform on the Bark (≈ logarithmic) scale, it is desirable to adapt the filtering criterion to this scale.
- modeling: echo durations are known to decrease as a function of frequency, if a variation inversely proportional with frequency is assumed, this leads to equi-length FIR filters on a logarithmic scale.
- tracking: high-frequency components appear to change more rapidly than low-frequency components, hence tracking capacity should increase with frequency (exponentially in this case as tracking capacity is proportional to the sampling rate, a wider band means a higher rate).

It is of course also possible to choose a intermediate scale between linear and logarithmic [20,21].

6. Conclusions

To compare the algorithms described in this article, three parameters have been chosen: processing delay, complexity and performance (a combination of final misadjustment and speed of convergence). The optimal algorithm will have "no delay", "low" complexity and "optimal" performance. This algorithm is denoted by IDEAL in figure 9. The LMS algorithm has indeed

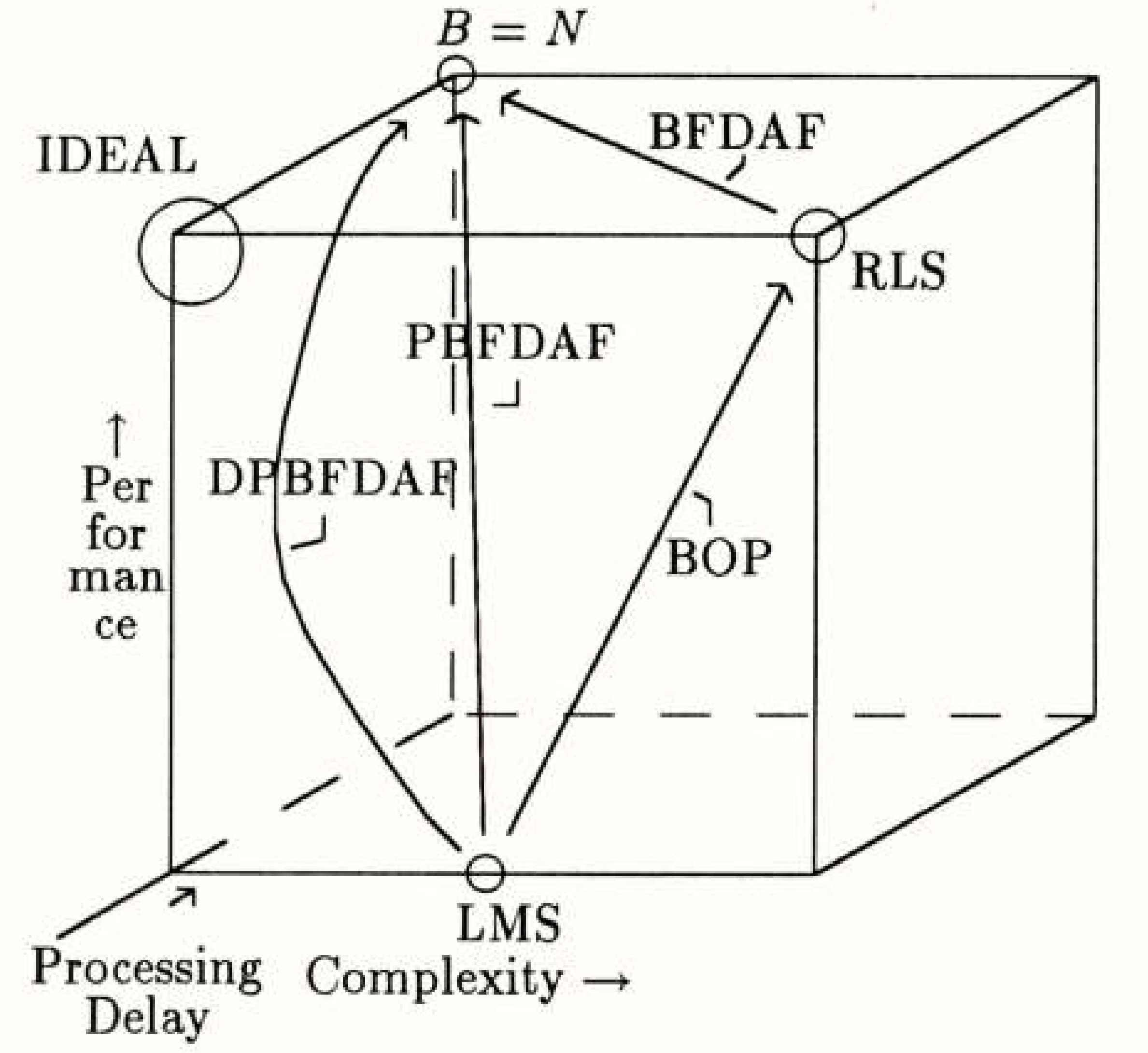


Figure 9: Comparing different AF algorithms.

(almost) no delay, but complexity and especially performance are not to good. An efficient RLS algorithm, like the FTF, introduces more complexity for a better performance, with an efficient BOP implementation, like the FNTF, lying somewhere between LMS and RLS.

The frequency domain transformation in BFDAF is only efficient for large block-sizes ($B=N$ in the figure), but then a lot of delay is introduced. The PBFDAF algorithm will be somewhere between the last case and the LMS algorithm, depending on the partition factor. By taking a arbitrary PBFDAF algorithm a DPBFDAF algorithm can be constructed with lower

complexity and better decorrelation properties by decreasing the update part partition factor (and thus increasing the update part block length). Tracking properties will however decrease somewhat, as these are depending on the rate and block size in the update part.

A SAF with a complexity and performance comparable to a DPBFDAF will have a larger delay than that DPBFDAF (not depicted in figure 9).

Wavelett transform based adaptive filters are not yet investigated enough for a good comparison to other algorithms.

References

1. Widrow B. and Stearns S.D., "Adaptive Signal Processing", Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1985.
2. Morf M. e.a., "Fast algorithms for recursive identification", Proc. 1976 Conf. Decision Contr., Clearwater Beach, FL, Dec. 1976, pp 916-921.
3. Slock D.T.M. and Kailath T., "Numerically Stable Fast Transversal Filters for Recursive Least Squares Adaptive Filtering", IEEE Trans. on ASSP-39, no. 1, Jan. 1991, pp 92-114.
4. Ozeki K. and Umeda T., "An adaptive Filtering Algorithm Using an Orthogonal Projection to an Affine Subspace and its Properties", Electronics and Communications in Japan, vol. 67-A, no. 5, 1984, pp 19-27, translated from: Denshi Tsushin Gakkai Ronbushi, vol. 67-A, no. 2, Feb. 1984, pp 126-132.
5. Sommen P.C.W., "On the Orthogonal Projection method for Adaptive Filters", in: Progress in systems and control theory 5, Proc. Sym. MTNS-89, vol. 3, Basel: Birkhäuser, 1990, pp 283-290.
6. Pétillon T. e.a., "Complexity Reduction in Fast RLS Transversal Adaptive Filters with application to acoustic echo cancellation", Proc. ICASSP-92, San Fransisco, CA, March 1992, pp IV-33 - IV-40.
7. Slock D.T.M., "Underdetermined Growing and Sliding Window Covariance Fast Transversal Filter RLS Algorithms", in: Signal Proc. VI, Proc. EUSIPCO-92, vol. 2, Brussels, Aug. 1992, pp 1169-1172.
8. Ferrara E.R., "Fast Implementation of LMS Adaptive Filter", IEEE Trans. on ASSP-28, Aug. 1980, pp 474-475.
9. Clark S.M. e.a., "A Unified Approach to time- and frequency-domain realization for FIR Adaptive Digital Filters", IEEE Trans. on ASSP-32, no. 5, Oct. 1983, pp 1073-1083.
10. Mansour D. and Gray A.H., "Unconstrained Frequency-Domain Adaptive Filter", IEEE Trans. on ASSP-30, no. 5, Oct. 1982, pp 726-734.
11. Sommen P.C.W. e.a., "Convergence Analysis of a Frequency-Domain Adaptive Filter with Exponential Power Averaging and Generalized Window Function", IEEE Trans. on CAS-34, no. 7, July 1987, pp 788-798.
12. Asharif M.R. e.a., "Frequency Domain Noise Canceller: Frequency Bin Adaptive Filtering", Proc. ICASSP-86, Tokyo, Sept. 1986, pp 2219-2222.
13. Soo J.S. and Pang K.K., "A new structure for Block Fir Adaptive Digital Filters", Proc. IEEE Conf., Sydney, Sept. 1987, pp 364-367.
14. Sommen P.C.W., "Partitioned Frequency Domain Adaptive Filters", proc. Asilomar conf. on Signals and Systems, Pacific Grove, CA, USA, 1989, pp 676-681.
15. Sommen P.C.W., "On the Convergence Properties of a Partitioned Block Frequency Domain Adaptive Filter (PBFDAF)", in: SIgnal Proc. V, Proc. EUSIPCO-90, Barcelona, Spain, 1990, pp 201-204.
16. Egelmeers G.P.M., "Decoupling of Partition Factors in Partitioned Block FDAF", Proc. IEEE&ProRisc Workshop on Circuits, Systems and Signal Processing, Houthalen, Belgium, March 1993.
17. Itoh Y. e.a., "An acoustic echo canceller for teleconference", Proc. ICC-85, vol. 3, pp 46.6.1-46.6.5.
18. Kellerman W., "Kompensation akustischer Echos in Frequenzteilbändern", Frequenz 39, 1985, pp 209-215.
19. Kellerman W., "Analysis and Design of Multirate Systems for Cancellation of Acoustical Echoes", Proc. ICASSP-88, New York, April 1988, pp 2570-2573.
20. Slock D.T.M., "Fractionally-Spaced Subband and Multiresolution Adaptive Filters", Proc. ICASSP-91, Toronto, Canada, May 1991, pp 3693-3696.
21. Erdöl N. and Basbug F., "Wavelett Transform based Adaptive Filtering", in: Signal Proc. VI, Proc. EUSIPCO-92, vol. 2, Brussels, Aug. 1992, pp 1117-1120.
22. Egelmeers G.P.M. and Sommen P.C.W., "Relation between Reduced Dimension Time and Frequency Domain Adaptive Algorithm", in: Signal Proc. VI, Proc. EUSIPCO-92, vol. 2, Brussels, Aug. 1992, pp 1065-1068.

Voordracht gehouden tijdens de 408e werkvergadering.

INFORMATIETHEORIE: EEN TERUGBLIK OP DE EERSTE PERIODE

F.L.H.M. Stumpers, hoogleraar emer., K.U. Nijmegen, Utrecht
Eerder wetensch. adviseur NV Philips, erepresident U.R.S.I., erelid N.E.R.G.

Information Theory. Looking back at the first twenty years.
A survey is given of Wiener's and Shannon's contributions of 1948, and of Khinchine's revision of Shannon's theory. The U.R.S.I. Plenary Assembly of Zurich 1950 is sketched, because it was probably the first international meeting on information theory, soon followed by London 1950. A survey is given of the papers in both meetings, and of London 1952. In the Netherlands the significs symposia of 1953 and 1954 had close connections with Information Theory. Followed the 3d London Symposium of 1955, and the Symposium of Namen, Belgium on cybernetics 1956. We also mention the Varenna symposium of 1957 and the Teddington Symp. of the same year. A Delft symposium on Data Communication was held in 1961. We give a more detailed review of the IRE Symp. on Information Theory, Brussels, 1962 and Noordwijk 1970. The reasons for moving the 1967 Inf. Theory from Athens to San Remo are given, and one of its famous contributions is mentioned.

Voor mij begon de informatietheorie met de publicaties van Wiener "Cybernetics" en Shannon "A Mathematical theory of communication". Jammer genoeg waren in Cybernetics veel druk- en andere fouten geslopen. Dat kwam gedeeltelijk, omdat het Engelse boek in Frankrijk gedrukt werd. Een andere moeilijkheid was, dat Wiener's assistenten verschillende keren gedacht hadden, een fout gevonden te hebben. Als ze er dan mee bij de professor kwamen, wist hij aan te tonen, dat wat er stond toch correct was. Als dat een paar keer gebeurd was, hadden ze natuurlijk weinig zin, om het nog eens te proberen. Bij de nieuwe druk in 1961, die ik toevallig te bespreken kreeg, werden deze fouten vermeden. Het boek had in belangrijke mate te doen met werk, dat Wiener over een periode van tien jaar deed, samen met de cardioloog dr. Artur Rosenblueth, die eerst bij de Harvard Medical School, en later bij het Instituto Nacional de Cardiologica van Mexico werkte.

Wiener was enerzijds geïnteresseerd in servomechanismes – hij wilde, zoals veel geïmmigreerde Amerikaanse mannen van wetenschap, graag zijn land helpen bij de oorlogsinspanning, die hij verwachtte nodig te zijn, en kreeg toen de opdracht iets aan het richten van luchtafweergeschut te doen, en anderzijds was hij erin geïnteresseerd te weten, hoe bij de mens of ook bij het dier allerlei processen geregeld worden. Hij bestudeerde ook het probleem van de hartslag en afwijkingen daarbij. Van der Pol had, al in de dertiger jaren, dit bekeken als toepassing van zijn relaxatietrillingen. Voor het fysiologisch begrip, had Wiener veel steun aan dr. Mac Culloch (Univ. Illinois) en dr. Lorente de No (Rockefeller Inst.).

De ondertitel van Cybernetics is: "On Control And Communication in the Animal and the Machine", waarbij terugkoppeling natuurlijk een grote rol speelt. "Cybernetics" komt van het Griekse equivalent van stuurkunde, in het Frans "L'Art de Gouverner" (Ampere), ook het Engelse "The Governor" (Maxwell) ligt in de buurt. In het derde hoofdstuk van "Cybernetics" voert Wiener de logaritmische bepaling van hoeveelheid informatie in. Voor de behandeling van ruis verwijst hij naar zijn eigen werk over de Brownse beweging en ook over Fourier theorie. Dit leidt tot dezelfde definitie voor de hoeveelheid informatie in het samenstel: Ruis plus boodschap, als we later bij Shannon zullen vinden. Bij de discussie van terugkoppeling wijst Wiener op de mogelijkheid van het optreden van oscillaties, ook in fysiologische stuurmechanismes, met een verwijzing naar Van der Pol voor relaxatie-trillingen. Hij tracht ook analogieën te vinden tussen computers en het zenuwsysteem met reflexen en boodschappers. Het hoofdstuk "Cybernetics and Psychopathology" behandelt de vraag, of zelfs iemand zonder specifieke psychiatrische kennis niet kan leren van fouten, die zowel in computers als zenuwsystemen op kunnen treden. Aan de tweede druk heeft Wiener twee nieuwe hoofdstukken toegevoegd: "On Learning and Self-Reproducing Machines" en "Brain Waves and Self-Organizing Systems".

Al in februari 1942 verscheen een ander boek van Wiener: "Extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series. With engineering applications". Maar het was toen nog "classified", een vorm van geheimhouding, en pas in 1949 voor iedereen verkrijgbaar. Het bevat o.a. uitvoerig de theorie van optimale predictie, toen nodig voor het best mogelijk richten van luchtafweerkanonnen, maar later ook gebruikt in mobiele communicatie. In zijn autobiografie: "Ex-prodigy: My childhood and youth" en "I am a mathematician. The later life of a prodigy" gaat Wiener ook in op enkele moeilijkheden, die het werk in oorlogstijd nu eenmaal meebracht. Er was hem op het hart gedrukt, dat spoed in het behalen van resultaten erg van belang was, en hij gebruikte benzedrine om lang te kunnen werken. Helaas maakte dat middel hem nog spraakzamer dan anders, zodat hij niet altijd dacht aan de strikte opdracht tot geheimhouding. Toen het op de praktische toepassing van zijn ideeën aankwam, vonden de autoriteiten zijn verdere deelname niet zo noodzakelijk meer, en ze vroegen Wiener de theoretische achtergrond goed op te schrijven. Dat gebeurde dus in dit boek, dat vanwege de gele kaft en de moeilijke inhoud al spoedig "het gele gevaar" genoemd werd. Een ander nadeel van de te grote inspanning, die Wiener zich getroostte, was dat hij bij de bespreking van de resultaten nogal eens in slaap viel. Die gewoonte had hij later ook nog wel, en ik herinner me een M.I.T. bijeenkomst over cybernetica, waarbij de Engelsman dr. Bronowski het woord voerde, en al in het begin het werk van Wiener uitvoerig geloofd had. Binnen een kwartier snurkte Wiener, en morste zijn vest vol met sigarenas. Hij was wel heel snel compleet wakker, toen de spreker ophield, en stelde enkele goede vragen. Bose, die in die tijd zijn assistent was, dacht, dat als Wiener wakker bleef bij een lezing, hij zeker met iets anders bezig was, en dat hij in zijn slaap althans dat ene onderwerp kon volgen. In "I am a mathematician" wordt ook uitvoerig aandacht geschonken aan het werk van de Russische mathematicus Kolmogoroff, die in dezelfde richting als Wiener aan tijdreeksen werkte: "Nevertheless, all my real deep ideas were in Kolmogoroff's work before they were in my own, although it took me some time to become aware of this". Wiener had ook een Russisch boek over predictietheorie, communicatietheorie e.d. gelezen, dat uitvoerig refe-

reerde aan zijn werk, en dat daarbij heel eerlijk behandelde, beter dan hij, gezien de internationale omstandigheden mocht verwachten. Ik denk, dat Wiener niet minder royaal wilde zijn, en ook daarom over Kolmogoroff schreef: "There is good reason for considering him not only as an independent discoverer of large parts of the subject but as the first man to write on it".

Ook Shannon kwam bij Bell Telephone aan het luchtafweer werk in de groep van T.C. Fry. In 1946 verscheen een classified report (met Bode en Blackman): "Data smoothing and prediction in fire control systems" en in 1950 een artikel (met Bode): "A simplified derivation of linear least square smoothing and prediction theory." (Proc. IRE 1950, 417-425). Ook cryptografie had in deze periode zijn aandacht. Liversidge schrijft aan Shannon's medewerking het succes toe van de geheime radioverbinding tussen Roosevelt en Churchill gedurende de tweede wereldoorlog. Later verscheen "Communication theory of secrecy systems" (B.S.T.J. 1949), (geheim rapport 1945). Keren we nu terug naar Shannon's communicatie werk. Viterbi vatte dit werk samen in drie lessen (1991):

De eerste les is: Wees voorzichtig met het afschrijven van informatie. Werp nooit prematuur informatie weg, die nog nuttig kan zijn, om een beslissing te nemen dus voordat alle beslissingen, die met deze informatie samenhangen volledig genomen zijn.

De tweede les: Scheidt de technieken voor digitale bron compressie van die voor kanaal transmissie, hoewel de ene groep redundantie verwijdert en de tweede groep redundantie veroorzaakt.

De derde les: In het bijzijn van storingen, bewust of onbewust aangebracht, kan de communicatie degradatie niet erger zijn, dan die, welke gaussische ruis van equivalent niveau zou veroorzaken. Derhalve is de optimale strategie van de doelbewuste stoorder, gaussische ruis te produceren. Tegenover dit soort storingen zal de beste golfvorm voor de communicator er uitzien als statistisch gaussische ruis. De "minimax" oplossing van het probleem is, dat signalen en ruis er beide uitzien als ruis, dat zo brede band mogelijk is. Viterbi beschouwt dit als een argument voor code divisie multiple acces.

Aan het eind van zijn artikel vat Shannon zijn verwantschap met Wiener als volgt samen: Ik moet krediet geven aan professor Wiener, wiens elegante oplossing van de problemen van filtering en predictie van stationaire ensembles mijn denken in dit veld belangrijk beïnvloed hebben. En ook: "Communication theory is heavily indebted to Wiener for much of its basic philosophy and theory. His report contains the first clear-cut formulation of communication theory as a statistical problem, the study of operations on time series."

In het eerste deel van zijn artikel behandelt Shannon discrete systemen zonder ruis. In het tweede deel discrete signalen met ruis. Daarbij komt o.a. efficiënte fouten correctie ter sprake. Als voorbeeld neemt hij een code van Hamming, waarbij van 4 boodschap symbolen en 3 correctie symbolen gebruik gemaakt wordt. Wanneer er hoogstens een symbool van zo'n zevental fout is, kan men dat symbool vinden en corrigeren. Gedurende de oorlog had Van Duuren een eenvoudig systeem gevonden, om enkele fouten te detecteren. Hij beschouwde ook groepen van zeven symbolen, en koos deze zo, dat er altijd 4 enen en 3 nullen waren. Dat gaf hem de keus uit 35 onafhankelijke symbolen. Bij ontvangst detecteert men alle enkelvoudige fouten, en ook alle fouten, die in een oneven aantal voorkomen. Men mist wel de even fouten, die tot een transpositie leiden, bijv. wanneer tegenover een een, die nul wordt, een nul staat, die een geworden is. Dit systeem, gebruikt in telex over radio, vond algemene toepassing, en werd door C.C.I.R. gestandaardiseerd. Wanneer gedetecteerd is, dat een signaal van zeven symbolen een fout heeft, zendt men een speciaal signaal terug, dat vraagt om heruitzending. In 1984 gaf IEEE een speciaal nummer van "Communications Magazine" uit ter herdenking van 100 jaar vooruitgang in telecommunicatie. Ik schreef er een artikel voor en ook Paul Green. Hij sprak er zijn verbazing over uit, dat na al het onderzoek over fouten correctie, de eenvoudige methode van Van Duuren had stand gehouden tegenover de slimmere methoden, die toch mogelijk zijn. Alleen in geval van lange duur van een heen en weergaand bericht, zoals bij satellietcommunicatie komt de ingewikkelde methode van fouten correctie aan de beurt. Hij vermeldt niet, dat de eenvoudige methode ook adaptieve mogelijkheden heeft, bijv. door verlenging van de tijdsduur van symbolen, als er teveel fouten komen. In hetzelfde nummer staat ook een interessant interview van Price met Shannon, waaruit blijkt, dat hoewel de term informatietheorie niet voorkomt in Shannon's meest bekende artikelen, hij deze term al in 1945 gebruikte in een intern Bell Labs Report.

De Internationale Wetenschappelijke Radio Unie had al een voordracht "On the evaluation of transmission efficiency according to Hartley's expression for information content" in 1948. De definitie van Hartley (1928) was oorspronkelijk de logaritmische definitie van informatie inhoud voor telegrafie systemen, hoewel hij ook al dacht aan toepassing op muziek en geluid, maar **Clavier** behandelt puls-amplitude-modulatie, puls-tijd modulatie, puls-tel-modulatie, puls-frequentie modulatie. In 1950 werd Van der Pol voorzitter van de U.R.S.I. Commissie "On Radio Waves and Circuits". Hij richtte gedurende die vergadering een subcommissie voor informatietheorie op, waarvan de taak was: 1) Alle publicaties over het onderwerp bijeen te brengen, en zowel de algemene theorie als de toepassingen ervan te onderzoeken. 2) De praktische implicatie van de informatietheorie voor de praktijk van de telecommunicatie te beschouwen en C.C.I.R. te informeren over het resultaat van deze studies. Hij verzocht mij als secretaris van deze commissie op te treden. In de C.C.I.R. werd het onderwerp toegewezen aan een subcommissie van Studiegroep III (Vaste Diensten), lange tijd onder voorzitterschap van dr. Van Duuren. Van een subcommissie voor theoretische problemen werd ik voorzitter, en Mr. Kirby, de latere Directeur van C.C.I.R. werd voorzitter van de subcommissie voor praktische problemen.

Dit heeft tot een jarenlange intensieve samenwerking op verschillende gebieden geleid. In het U.R.S.I. Bulletin van Juli-Augustus 1951 (p. 21-31) verscheen mijn eerste bibliografie van de informatietheorie, tevens C.C.I.R. doc. 185, Genève 1951. Tot de deelnemers in de eerste subcommissie behoorden: **Dennis Gabor**, die ook een "Theory of communication" had geschreven in 1946, waarin hij tijd en frequentie aspecten van communicatie bestudeerde, zij het nog zonder ruis. (In 1959 zou hij professor worden op Imperial College, London.) **M. Golay (Zwitserland-USA)** besprak coherente detectie van infrarode golven. Hij werd bekend door virtuoze codes.

M. Ville (F), die het analytisch signaal behandelde, **J. Oswald** (F), die de Hilbert ruimte van signalen met beperkt spectrum beschouwde met lineaire en niet-lineaire transformaties. Hij schreef later ook een aardig boek over informatietheorie. **R. Fortet**, die wiskundige beschouwingen over entropie gaf. **M. Blanc Lapierre** behandelde de wiskunde van ruisproblemen. **Moxon-Admiralty (U.K.)** behandelde coherente detectie bij communicatie en radar. **Watson (U.K.)** behandelde mathematische methoden in de niet-lineaire theorie van oscillaties. **P.M. Woodward (U.K.)** gaf een mathematische theorie van de ontvangst van radar signalen, waar hij op verschillende congressen uitbreidingen zou geven, en waarover hij een boek schreef. **D.A. Bell (U.K.)** behandelde entropie in informatie.

Een week na het U.R.S.I. congres (Sept. 11-22, 1950) had in Londen een internationaal informatie theorie symposium plaats (26-29 Sept. 1950) onder leiding van prof. Willis Jackson in de zaal van de Royal Society, alleen voor genodigden. Van der Pol was uitgenodigd, maar kon niet, in verband met ITU aangelegenheden. (Hij zou wel deelnemen aan de schriftelijke gedachtenwisseling, wat kon, omdat de papers voor het congres werden rondgezonden.) Hij vroeg mij, of ik er heen wilde, en telefoneerde op mijn bevestigend antwoord met Jackson. Het bleek mogelijk. Voor Nederland waren er prof. Bast (PTT), dr. Rodenburg en dr. Schouten (PTT), prof. Van Soest (Delft) en ik. In die tijd was dr. Colin Cherry een assistent bij Jackson, en hij had het grootste aandeel in de organisatie. De Engelsen hadden een heel ruime kijk op, wat onder informatietheorie viel. Shannon, die er ook was, zei me zich te verbazen over de hoeveelheid vakken, die eronder viel. Elke ochtend en middag waren er twee sprekers, die met een samenvatting van hun betoog konden volstaan, omdat de volledige tekst verspreid was.

Colin Cherry gaf de geschiedenis van de informatietheorie van de Egyptische hiëroglyfen en het oude Hebreeuws af. De bevrijde slaaf Tyros vond de stenografie uit, waarmee hij Cicero's toespraken optekende. Geheimschrift is zo oud als de Bijbel. Een van de eerste codes werd gegeven door Polybius, 150 voor Christus: Iedere letter kreeg twee coördinaten, de ene voor het nummer van een tablet, de andere voor de plaats daarop. Fakkels in rechter- en linkerhand gaven de getallen aan. Het dagboek van Samuel Pepys was in geheimschrift. Sommige geschriften van Roger Bacon zijn nog niet ontcijferd. De eerste letterfrequentie tabellen werden gegeven door Simonetta (Milaan, 1350). Porta gaf in 1658 diagram frequenties. Leibniz wilde een universele logische taal opbouwen met mathematische symbolen. **Shannon** volgde in zijn eerste voordracht zijn eerste artikel in Bell System T.J. **Gabor** besprak in "Communication Theory and Physics" het effect van de quantum physica op de overdacht van informatie met behulp van photonen. **Mac Kay** was de filosoof van de informatietheorie, structurele informatie en logons, metrische informatie en metronen, selectieve informatie en bits, alles werd heel precies uitgelegd. **Bartlett** sprak over statistische aspecten van tijd reeksen, en Fisher's informatie functie. **Shannon** besprak enkele topologisch eenvoudige communicatie netwerken. **Woodward** gaf de theorie van radar informatie. **Mac Donald** besprak Brown'se beweging en ruis. **Fry** besprak de eigenschappen van gesproken Engels met morphemen en phonemen. Het aantal morphemen is ongeveer gelijk aan het aantal woorden, voor een gemiddeld iemand ca. 100.000. **Rushton** vroeg zich af, hoe de hersens informatie ontvangen van de ogen. **Hick** besprak reactie tijden als functie van het aantal keuzen, waaruit gekozen wordt. **Grey Walter** liet zijn elektro-mechanische schildpadden zien, die neuroses konden krijgen. **Bates** besprak de betekenis van de informatietheorie voor de neurofysiologie, ook bij dieren. **Uttley** besprak: Informatie, machines en hersens, in de geest van cybernetica. **Dr. Eliot Slater** sprak over het programmeren van computers om schaak te spelen, uiteraard mede naar aanleiding van het artikel van Shannon over dit onderwerp. Hij bekeek statistisch een aantal toernooien en matches van 1914 tot 1933 en vond, dat de factor beweeglijkheid een grote rol speelde. Dit kwam m.i. gedeeltelijk, doordat de meeste spelen uit deze tijd nog tot de klassieke open spelen behoorden. Het heeft natuurlijk wel zin, om zo'n onderzoek nog eens te doen met partijen van Kasparov, Karpov en sterke grootmeesters van deze tijd. Overigens zijn de computers sinds die tijd aanmerkelijk beter gaan spelen. **Westcott** sprak over Criteria voor predictie en discriminatie in het gevolg van Wiener. Het laatste deel van het symposium boek is gewijd aan discussies van de voordrachten. Dit symposium boek was de eerste uitgave van de IRE Group on Information Theory.

Voorlopers van de informatie theorie

Behalve **Hartley**, geldt ook **Nyquist** als iemand, die al lang tevoren, ideeën had, die goed in de latere informatietheorie pasten, bijv. over de relatie van telegrafie snelheid tot bandbreedte, en over het ruis vermogen van weerstanden en kabels. (1924, 1928, Bell System Tech. J.) Ook **Wiener's** theorema over de relatie tussen vermogensspectrum en auto-correlatie functie bij stationaire processen, tegenwoordig meestal **Wiener-Khintchine** theorema genoemd, dateert al van 1932. **(Khintchine 1934.) Middleton en Van Vleck** vonden in 1946 het optimale filter voor puls-signalen in gaussische ruis: De filter karakteristiek moet de geconjugeerde zijn van de Fourier transformatie van de puls. Dit geldt zowel voor visuele als voor gehoor en meter ontvangst. Het bewijs volgt direct uit een stelling van Schwarz. Het optimale filter heeft als impuls responsie de gegeven puls, in omgekeerde volgorde doorlopen. Ook het proefschrift van **Kotelnikov** geldt als een belangrijke voorganger van Shannon: "The theory of optimum noise immunity" Moscow 1947. De keuze van orthogonale signalen in systemen met beperkte bandbreedte, die Shannon ontleent aan Whitaker (1935), wordt ook wel aan Kotelnikov (1933) toegeschreven.

Voortzetting van en verbetering van Shannon's theorie

Shannon publiceerde in 1949 een artikel "Communication in the Presence of Noise". Hierin vinden we het capaciteitstheorema: Wanneer P het gemiddeld zender vermogen is, de ruis thermische witte ruis is met vermogen N in de band W, dan kan men door goede codering binaire digits met een snelheid C overbrengen, met zo'n kleine fouten frequentie als gewenst.

$$C=W\,(\log_2 \underline{P+N} - \log_2 N)$$

Dit resultaat werd onafhankelijk ook door Tuller gevonden (1949).

Shannon ging het in de eerste plaats om praktische resultaten, en hij kon daarbij niet voldoende aandacht schenken aan mathematische precisie. Mc Millan (ook Bell Labs) was de eerste, die probeerde begrippen, zoals bron, kanaal, code, mathematisch exact te definiëren. Hij kon daardoor meer algemeen stellingen bewijzen, die Shannon alleen voor Markov'se bronnen aangegeven had. Mc Millan zag, dat Shannon's bewijs zelfs voor Markov bronnen leemten had. Hoe die leemten in te vullen zijn, werd door Mc Millan aangeduid, maar niet volledig behandeld. Feinstein heeft evenals Mc Millan geprobeerd de stelling van Shannon over kanalen met ruis streng te bewijzen, maar hij voert zijn bewijs alleen door voor het praktisch weinig actuele geval door, dat opvolgende signalen volledig onafhankelijk zijn, en dat het kanaal geen geheugen heeft. Khinchine, van wie de zojuist geciteerde kritische opmerkingen over Mc Millan en Feinstein afkomstig zijn, is de weg van Mc Millan en Feinstein nog eens gegaan, en hij is van hun weg afgeweken, waar deze leemten vertoont, of de geldigheid onnodig beperkt. De lezer zal gewaarworden, dat de weg naar de stellingen van Shannon lang en doornig is, maar de wetenschap staat blijkbaar geen kortere weg open, wanneer men geen onnodige beperkingen van het te onderzoeken materiaal wil toelaten, en ook geen beweringen wil toelaten, die men niet bewijzen kan. Khinchine 1953, 1956 (Russisch), 1957 (Engels), 1961 (Duits).

Het tweede internationale informatiesymposium van Londen, 1952

Na de openingsrede van **Willis Jackson** gaf **Gabor** een overzicht van de informatietheorie. Het onderwerp van de eerste serie lezingen was: Transmissie systemen en codering. **Jelonek, Goldman** en **Mac Kay** vergeleken verschillende modulatie systemen tegen de achtergrond van de informatietheorie. **Huffman** gaf zijn codering met minimale redundantie voor bood-

schappen, bestaande uit een eindig aantal elementen. In deze zitting hadden we ook twee Nederlandse deelnemers, **De Jager** sprak over deltamodulatie. en **Van 't Groenewout** over niet-lineaire distorsie in PCM systemen. De tweede serie ging over communicatie bij aanwezigheid van ruis. **Bailey** en **Middleton** behandelden radar, **Hampton** autocorrelatie en kwadratische detectors. **Fano** kiest een van M signalen in gekleurde ruis. Verder kwamen er nog zittingen over de theorie van het gehoor, over spraak, over taal, en televisie. Na het symposium ging ik op uitnodiging van prof. Wiesner naar M.I.T., met verlof van het Philips Nat. Lab. Eigenlijk zou ik nagaan, of ik met behulp van predictie theorie iets meer kon zeggen over de elfjarige periode in de zonneactiviteit. Ik kon daarvoor geen goed aanknopingspunt vinden, en heb ook niet gehoord, dat het anderen na mij, beter gegaan is. Toen heb ik nog wat met Fano naar meer handelbare problemen gekeken. Zoals ik al vermeld heb, had ik al eerder aandacht geschonken aan een bibliografie van de informatietheorie voor U.R.S.I. en C.C.I.R. Ik vond de gelegenheid gunstig met zoveel specialisten, om opnieuw een bibliografie te maken. Die was eind 1952 klaar en verscheen begin 1953 als Research Report van het M.I.T. Res. Lab. of Electronics. Ook dank zij de contacten, die ik bij M.I.T. had, zoals met Mc Culloch, Wiener, Wiesner en Fano, gaf het boekje een goed overzicht en het moest vrijwel direct herdrukt worden. De I.R.E. Group on Information Theory werd kort daarna gevormd, en een herdruk van mijn bibliografie was het tweede werk, dat ze onder hun leden e.a. verspreidde. Van der Pol liet bij I.T.U. abstracts opzoeken van de erin vermelde artikelen, en dit werd een C.C.I.R. boek. Ik behoorde ook tot de eerste leden van de I.R.E. Group, die later de IEEE Society on Information Theory zou worden. In 1954 werd ik uitgenodigd om lid te worden van het Administrative Committee van deze groep, later zou dat Board of Governors heten. Ik behoorde daartoe van 1955 tot 1962, en was ook daarna nog verschillende jaren lid van het symposium comité. In 1955, 1957 en 1960 verschenen aanvullingen op mijn bibliografie in IEEE Trans. Inf. Theory, en als C.C.I.R. boek.

In 1953 werd in **Amersfoort een Symposium over semantische en signifische aspecten van communicatietheorie** gehouden. Dit werd georganiseerd door de International Society of Significs. De Proceedings verschenen in het tijdschrift "Synthese", nrs. 3 t/m 5, 1953. Na een inleiding van de voorzitter, **dr. Esser**, sprak **prof. Van Dantzig** informeel over het begrip "informatie" als verandering in de waarschijnlijkheid. **Dr. Vuysje** sprak mede namens **prof. Mannoury** over het hoofdthema en de theorie van de semantische informatie, gegeven door Bar-Hillel en Carnap. **Rapoport** en **Van Soest** spraken over het concept "informatie". **Mac Kay** sprak over het verschil tussen informatie en informatie-inhoud. **Schouten** voerde nieuwe begrippen in: manipulatie en endechy. Manipulatie telt het aantal keren, dat men moet schakelen om een bepaald doel te bereiken: Endechy is de som van entropie en informatie. **Dov Tamari** (Israël sprak over Turing machines en het begrip "woord". In de zitting over "Cybernetica en het zenuwstelsel" gaf **prof. Drooglever Fortuyn** de inleiding, en sprak **dr. Mc Culloch** over "Information in the head". Het gezicht, het gehoor, de reuk, de pijn, hebben alle corresponderende secties in de cortex. Men krijgt de indruk, dat **Mc Culloch** van vrijwel alle research op zijn gebied op de hoogte was; desondanks zijn er nog veel hypotheses. **Karreman** (Mathematische biologie, Chicago) schrijft fysiologische reacties toe aan calciumphosphide en kalium. De niet-lineaire vergelijkingen kunnen ook oscillaties beschrijven. **Hessel de Vries** beschreef de informatie capaciteit van het menselijk oor en van de cochleaire zenuw (9.10^6 bits/sec). **Van Soest** sprak over informatietheorie en sociologie. Evenals Schouten vindt hij, dat de som van informatie inhoud en entropie constant moet zijn. In een harmoni-



Foto 1: De deelnemers aan het Informatie Symposium van Amersfoort, 1953.

euze samenleving moet de som van plichten en rechten ook constant zijn. Het geldt hier slechts een eerste poging! Vice-admiraal **Poortman** gaf een overzicht van de logistieke organisatie, die hij probeerde op te zetten voor de Nederlandse marine. **Surindar Suri** probeert Mead's filosofie van de communicatie en de taal toe te passen op het sociale proces. **Bar-Hillel** en **Reiser** gingen in op semantische problemen in informatietheorie en cybernetica. **De Witte**, een linguist, sprak over automatische omzetting van spraak in schrift. **M. de Vries** sprak over geheimschrift.

Het volgende **internationaal signifisch congres**, Amersfoort 1954 had als algemeen thema: Interpretatie. **Apostel** gaf de inleidende voordracht over de interpretatie van geschreven teksten. **Van Soest** sprak over Informatie en interpretatie. **Loeb** over meerduidigheid bij binaire codes. Ik sprak over Informatietheorie en interpretatie, o.a. over de mogelijkheid typische eigenschappen van schrijvers te herkennen uit de tekst. **Somenzi**: Overmenselijke en automatische interpretatie in de physica. **De Witte**: Over psycholinguistische achtergronden van misinterpretatie. **Tamari**: Overinterpretatie in de wiskunde. De bijdragen werden in "Synthese" afgedrukt (1956-59).

Het derde internationale Symposium van de Informatie theorie, Londen 1955

Onder: "Fundamenten" vielen twee Nederlandse bijdragen: **Van Soest**: Consequenties van de eindigheid van informatie, en **Schouten**: Ignorantie, kennis en informatie. Onder de andere bijdragen zijn die van **Gabor** en **Meyer Eppler** over optische transmissie interessant. In de sectie codering behandelde **Elias** naast het binaire kanaal, waarbij alleen o of 1 ontvangen wordt voor ieder uitgezonden symbool, ook het uitwiskanaal, waarbij er drie mogelijke symbolen ontvangen kunnen worden: o, 1 of X. Voor beide situaties kan men fouten correctie en fouten detectie toepassen, als er genoeg extra symbolen zijn. **Huffman** behandelde de werking van sequentiële filters en van de omgekeerden daarvan op rijen van enen en nullen. Dit verhaal is gemakkelijk te vertellen, en **Massey** gebruikte deze filters in "Threshold decoding". In de categorie taal analyse en mechanische vertaling gaven **Ross en Bell** een studie van welsh. **Fucks** keek naar het aantal lettergrepen per woord bij verschillende auteurs, en vond een groot verschil tussen Engels en Latijn, en een veel kleiner verschil tussen Shakespeare en Huxley of tussen Caesar en Sallust. Onder de machine vertalingen trok de omzetting in Braille de aandacht van **Cleave en Booth**.

De sectie over "meaning" en "zintuigen", had een theoretisch betoog van **Mac Kay**, die de mening verdedigde dat "meaning" toch een goed definieerbare plaats had in de informatie theorie, en **Somenzi** vroeg, of een machine gevolgtrekkingen kan maken, inductie kan plegen. Dat hangt van de definitie af! **Marcou en Daguet** schreven een spraak signaal als A(t) cos $\phi(t)$ en vroegen zich af, of cos $\phi(t)$ voldoende informatie geeft over spraak en dus als basis kan dienen voor compressie van spraak signalen. **Bruce** probeerde experimenteel te bepalen, in hoeverre de context helpt om woorden te verstaan. **Licklider** sprak over frequentie analyse in het gehoor, en schonk daarbij veel aandacht aan het werk van Schouten en Hoogland in Nederland. **Allanson en Whitfield** spraken over het gehoor, en **Gregory** over het zien.

Verschillende sprekers trachten te vinden, op welke wijze het menselijk zenuwstelsel informatie verwerkt, en wat de capaciteit ervan is: **Allanson, Taylor, Mc Culloch, Selfridge**, en **Broadbent**.

In 1956 vond in **Namen het eerste Internationaal congres over cybernetica** plaats, georganiseerd door **Prof. Boulanger**. UNESCO werd vertegenwoordigd door **Mr. Le Lionnais**. Er ging veel aandacht naar machines, automata en robots. **Mr. Grey Walter** zat de zitting voor over De cybernetica en het leven, waar **Zemanek** mechanische schildpadden besprak (geconstrueerd in Wenen), en een homeostat. **Reichardt** bestudeerde de wijze, waarop sommige insecten beweging waarnemen. **Van Lint** de cybernetica van de oogspieren. **Paycha** vroeg zich af, hoe computers kunnen helpen bij het maken van diagnoses van oogartsen. (Natuurlijk kan men de nodige experimenten aan assistenten over laten, en dan aan een computer met databank het maken van de uiteindelijke diagnose over laten, waarbij de computer desgewenst nog vragen kan stellen, bijv.: Verbleef de patiënt in de tropen?, als die voor de diagnose van belang zijn.) Helaas was de directie van het ziekenhuis in zijn geval niet geavanceerd genoeg, om het belang van de vooruitgang in te zien, en beoordeelde zijn contact met de patiënten als onvoldoende. Het fraai uitgegeven boek van 924 bladzijden kan in dit kort bestek geen recht gedaan worden.

In de periode van 1 september 1956 – 1 mei 1957 gaf ik op verzoek van dr. Schouten een college informatietheorie voor P.T.I. Het college dictaat werd uitgewerkt door ir. Milort. Schouten gaf een inleiding.

In 1957 werd in **Varenna** een sterk bezet **symposium over cybernetica en informatietheorie** georganiseerd door prof. **Caianiello** (Napels), met **prof. Norbert Wiener** als centrale persoonlijkheid. Naast Wiener waren ook **Lee, Fano, Bar-Hillel, Green en Slepian** uit de V.S., **Gabor** uit Engeland, **Mevr. deRaedt, Schouten, Schalkwijk, De Jager**, en ik uit Nederland, en natuurlijk veel Italianen. De meeste van de genoemden traden ook als spreker op, maar ik heb het verslag niet meer kunnen vinden.

In 1958 werd in **Teddington (U.K.) een symposium over "Mechanisation of thought processes"** gehouden. **Minsky, McCulloch, McCarthy, Ross-Ashby** en vele anderen spraken. Hun bijdragen en de discussie erover werden uitgegeven door Her Majesty's Stationary Office, London, 2 delen, 981 pgs., 1959.

In 1961 behoorde ik met dr. Barrow en dr. Van Duuren tot de organisatoren van **het internationale symposium over data communicatie in Delft**, waar de nadruk meer viel op praktische toepassing dan op theorie. Het was ook het eerste of een van de eerste symposia op dit gebied, zodat Barrow in zijn begeleidend artikel als titel koos: "Why, in the world, in Europe?".

In 1962 organiseerde ik het eerste **I.R.E. Symposium on Information Theory in Europa, in Brussel**. Prof. **Hoffman** hielp me aan de Universite Libre aan zalen en student assistenten. Er werden veel meer abstracts aangeboden, dan ik kon plaatsen. Ik zal ook wel eens een verkeerde keus gemaakt hebben. Een van de M.I.T. mensen schreef me: "U mist het stuk van de eeuw". Ik antwoordde, dat als prof. Fano een positief advies gaf, ik het alsnog zou nemen, en binnen een week had ik weer antwoord: "Prof. Fano is net zo ouderwets als U". Ik heb ook werkelijk waarschijnlijk een goed stuk gemist, maar degene, die het ingestuurd had, zei tegen me in Brussel: U hebt mijn stuk niet genomen, maar ik ben er wel bij Shannon op gepromoveerd. Ik kon alleen maar zeggen, dat hij me dat eerder had moeten laten weten! Alle stukken werden volledig afgedrukt in de Symposium Proceedings, die ik ook in Eindhoven liet afdrukken, ruim voor het Symposium. Na die tijd werden meestal slechts abstracts afgedrukt, en ook nog niet van te voren. Het werd een boek van 316 pgs. en in zijn geheel opgenomen in de Trans. I.R.E. on Information Theory. **Solomon** sprak over group codes, **Prange** over cyclische codes, **Bartee en Schneider** maakten een elektronische decoder voor Bose-Chaudhuri codes. **Huffman** besprak

impulse equivalente pulse reeksen. **Stiffler**: Synchronisatie van blok codes. **Brick en Zames** bespraken Bayes optimum filters volgens Wiener. **Zetterberg** besprak signaal detectie in een spel situatie, voor radar en data communicatie.

Abramson en Braverman spraken over patroon-herkenning in een willekeurige omgeving. Soortgelijke problemen behandelden **Fischler** c.s., **Ullman** en **Sebestyen**. Automatische herkenning van patronen in ruis was ook het onderwerp van **Basharinov** (Moscow).

Over spraak en de eigenschappen ervan gingen de bijdragen van **Koshikawa en Sugimoto, David, Schroeder e.a.**

Jespers, Chu en Fettweis vonden een nieuwe methode om correlatie functies te berekenen. **Battail** zocht naar het drempel-effect voor frequentie modulatie bij frequentie terugkoppeling. Meer algemeen zocht **Slepian** naar het drempel effect bij systemen, die de bandbreedte vergroten. **Perry en Wozencraft** onderzochten een fouten-correctie systeem, dat over kan gaan op fouten detectie en terugvraag, als fouten correctie moeilijk wordt. **Gerstein** maakte modellen voor neuronen. **Taylor** vroeg zich af, hoe het leren gaat in de cortex, en de rol daarbij van terugkoppeling. **Frank** vroeg naar de relatie tussen de informatie-inhoud van signalen en de reactie- of perceptie tijd. **Atkinson** onderzocht de gevoeligheid van de menselijke waarnemer bij psycho-fysische detectie experimenten. De matrix structuur van een lerende automaat werd bestudeerd door **Braines en Svechinsky** (Moscow). **Ziv** gaf een overzicht van zijn Sc. D. proefschrift bij M.I.T., over codering voor discrete tijd, continue amplitude kanalen zonder geheugen. Optimum transmissie in een eindige tijd was het probleem, waarvoor **Chang, Harris en Metzner** een oplossing zochten. **Fuchs** onderzocht formele structuren in de muziek van Beethoven, Bach, Strauss, Webern en Berg, bijv. frequentie distributies van toonhoogte; frequentie-distributie van intervallen tussen opvolgende tonen, correlatie van die intervallen. **Kailath** deed metingen aan variabele kanalen, zoals tropo-scatter verbindingen. **Logan en Schroeder** zochten een oplossing voor het probleem van compatibele enkel zijband transmissie (compatibel met dubbel zijband ontvangers). **De Jager en Van Gerwen** behandelden "Co-modulatie, een nieuwe methode voor zeer snelle data-transmissie". Een bandbreedte van 700-3100 Hz werd gebruikt voor transmissie van 4000 baud.

U.R.S.I. en C.C.I.R. Activiteiten op informatie theorie gebied

In U.R.S.I. COMMISSIE VI (Control theory, Circuit Theory, Information Theory, Electromagnetic Wave Theory) was ik oorspronkelijk verantwoordelijk voor informatietheorie, en organiseerde kleine symposia op de driejaarlijkse algemene vergaderingen, Den Haag 1954, Boulder 1957, Londen 1960, Tokio 1963, München 1966, Ottawa 1969, Warschau 1972, Lima 1975. Tot 1957 was ik secretaris van de subcommissie Informatietheorie, van 1957-1963 vice-voorzitter van commissie VI, van 1963 tot 1969 voorzitter, van 1972-1975 vice-voorzitter en in 1975 opnieuw voorzitter, samen met prof. Knudsen. Van 1975-1981 was ik vice-president van U.R.S.I. De driejaarlijkse symposia waren interessant en leidden meestal ook tot bijdragen aan de C.C.I.R., waar ik van 1956 tot 1978 gedelegeerde voor Nederland was. Ook daar begon de informatietheorie een grotere rol te spelen, toen de satelliet communicatie opkwam. Van de Studiegroep IV



Foto 2: De deelnemers aan het Symposium te Varenna in 1957.

over dit onderwerp was ik herhaaldelijk, vanaf de vergadering Monte Carlo, 1962 voorzitter van de subcommissie: Modulatie systemen en multiple access problemen.

1967 Internationaal Symposium Informatietheorie, San Remo, 1967
1970 Internationaal Symposium Informatietheorie, Noordwijk, 1970

Hoewel ik lid was van de symposium commissie verwachtte ik geen directe beslommeringen met het internationale symposium van 1967 in Athene, waarvoor de Griekse koning al erevoorzitter was. Begin augustus werd ik opgebeld met het verzoek een alternatieve plaats voor het symposium te vinden in verband met de zgn. kolonelsrevolutie. Italië zou voor de reeds georganiseerde speciale vlucht geen groot verschil maken, maar iedereen weet, dat men daar in augustus met vakantie is. Met enige moeite vond ik prof. Carassa op zijn vakantieadres, waar hij overdag zeilde, en 's avonds gelukkig bereikbaar was. Op zijn suggestie bereikte ik enkele van zijn medewerkers en de volgende dag reeds, was San Remo de nieuwe plaats voor het symposium. IEEE zorgde dat alle ingeschreven deelnemers bericht kregen, en vrijwel iedereen was op tijd aanwezig. Ik sprak in de openingszitting als voorzitter van U.R.S.I. Commissie VI. Een deelnemer, die een vakantiereis in Europa gecombineerd had met symposium, kwam een dag later. Ook te laat kwam prof. Kolmogoroff, die ons op donderdag vanuit Wenen opbelde. Speciaal voor hem werd een extra zitting georganiseerd op vrijdagmiddag. **Prof. Kolmogoroff** wilde graag in het Frans spreken, en een van de Franse deelneemsters, **mevr. Mourier**, bood aan dit in het Engels te vertalen. Helaas moest ze het na enkele zinnen opgeven, omdat ze niet begreep, wat de spreker bedoelde, De tolk, die de Russische ambassade ter beschikking had gesteld nam haar taak over. In "Logical basis for information theory" probeert Kolmogoroff waarschijnlijkheidsconcepten te vermijden. H(X/Y), de hoeveelheid informatie, die nodig is, om X te berekenen, wanneer Y bekend is, wordt gedefinieerd als de minimale lengte van een programma P (als rij van enen en nullen), dat hiervoor nodig is. Het deed denken aan de manipulaties, eerder door Schouten ingevoerd. Ik had daar op verzoek van Schouten ook al naar gekeken, maar het was ons niet gelukt, om mathematische precisie hierbij te bereiken. (Zie eerder genoemde bijdragen van Schouten in 1953 en 1955.) Martin Löv heeft in dit verband Bernoulli rijen bestudeerd, volgens Kolmogoroff met succes. Het natuurlijk gezag van de spreker, en het bewustzijn, dat men naar een van de heel groten op dit vakgebied geluisterd had, maakte veel goed, en er ontspon zich ook een prettige discussie.

In 1970 werd mij gevraagd nog eens een internationaal symposium in de Benelux te organiseren. Paul Green, die ik nog van M.I.T. kende was co-chairman. Huis ter Duin in Noordwijk had genoeg zalen en bovendien konden de meeste deelnemers er logeren. Een excursie per boot op woensdag naar de Delta werken, viel erg in de smaak. We hadden hoogstens vier parallelzittingen. De lijst van sprekers en officials telt 262 namen. Omdat er ook een aantal studenten van Nederlandse universiteiten mee deden, zal het totaal aantal deelnemers wel boven 300 gelegen hebben. De grote meerderheid der deelnemers kwam uit de Ver. Staten. 11 Bijdragen hadden minstens een auteur uit de Benelux. Er namen ook tien Russen deel. **Van Lint** gaf een paper in de speciale zitting op dinsdagmorgen: Over getal theorie en codering. Hij bewees ook, dat perfecte 2 en 3 fouten corrigerende Hamming codes niet bestaan. **Delsarte** (MBLE) sprak over automorphismen van Abel'se codes. **Kamminga** besprak een informatie-theoretische benadering van spraak herkenning. **Zegers** analyseerde de invloed van synchronisatie fouten bij data transmissie. **Fawe en Boorstyn** bespraken signalen met alleen reële nulpunten, met speciale aandacht voor signalen die afwisselend positieve en negatieve nuldoorgangen hebben. **Boekee** besprak een informatietheoretische aanpak van de taal met behulp van de vernieuwings theorie. (Het model van schrijftaal als een eerste orde Markov Proces.) **Verveen en Siebenga** maten de ruis spanning aan het neurale membraan van de kikvors (Ranvier's node). **Schalkwijk en Barron** (U. San Diego) bestudeerden sequentiële terugkoppel schema's met een beperkt piek vermogen. **Van der Meulen** (Rochester U.) besprak een communicatie kanaal met drie terminals, onder de aanname, dat de drie terminals elkaar zoveel mogelijk helpen. **Van der Spek** besprak de detectie van een ruimtelijk uitgebreid doel bij radar.

Er waren vier lange bijdragen in de grote zaal voor alle deelnemers, zonder parallel zittingen. De eerste was **Schroeder**: Spraak codering en het menselijk oor. **Forney** behandelde: Communicatie theorie en toepassingen in de ruimte. **Lucky** behandelde: Data communicatie via telefoon. **Elias** behandelde sorteren en schakelen. Mevr. **Mac Williams**: Cyclische en Abel codes. **Csibi**: Leren in relatie tot regressie problemen met geheugen. **Frost en Kailath**: Over innovatie bij niet-lineaire schatting in ruis. We hadden een hele zitting over optische communicatie met o.a. **Kennedy, Solimeno, Personick en Helstrom**. We hadden drie zittingen over codering, met **Chien en Hartmann** over cyclische codes en **Sloane** over codes, die enkele fouten corrigeren. We noemen nog **Schilling** over adaptieve delta-modulatie. **Cover** over Simultane communicatie, **Tarasenko** over fading, **Zakai en Ziv** over continue kanalen zonder geheugen, met terugkoppeling. **Berger** over bron codering als spel. Ik heb hiermee de congressen, die in de beginperiode van de informatietheorie, tussen 1950 en 1970, in de Benelux en Engeland werden gehouden, voor zover ik zelf daarbij was. Ik was ook bij verschillende congressen in de Ver. Staten, maar deze ook mee te nemen, zou te ver voeren.

Referenties

1. Claude Elwood Shannon, Collected Papers, ed. Sloane, Wyner. IEEE Press 1993.
2. Symposium on Information Theory, London 1950. Report of Proceedings. Min. of Supply, London. Sept. 1950.
3. Communication Theory, ed. Willis Jackson. Butterworth Scient. Publ. 1953. (London Symp. 1952).
4. Information Theory, London Symp. 1955. Ed. Colin Cherry. Butterworth. 1956.
5. P.A. Woodward: Probability and Information Theory, with Applications to Radar. Pergamon Press 1953.
6. A.I. Khinchin: Mathematical Foundations of Information Theory. Dover Publ. 1957 (transl. Silverman, Friedman).
7. Key Papers in the Development of Information Theory, ed. D. Slepian, IEEE Press 1974.
8. A.N. Kolmogoroff: Logical basis for Information Theory. IEEE Trans. Inf. Theory. 1968, 662-665.
9. 1970 Int. Symp. Inf. Theory, IEEE-U.R.S.I., Noordwijk: Program and Abstracts of Papers.

Voordracht gehouden tijdens de 409e werkvergadering.

NEDERLANDS ELEKTRONICA- EN RADIOGENOOTSCHAP
409e werkvergadering
WERKGEMEENSCHAP VOOR INFORMATIE- EN COMMUNICATIETHEORIE
IEEE BENELUX CHAPTER ON INFORMATION THEORY

UITNODIGING voor de lezingenavond woensdag 17 februari 1993 in Aristo Zalencentrum, Vestdijk 16a, Eindhoven (100 m vanaf het station.).

THEMA: INFORMATIETHEORIE IN DE BENELUX

PROGRAMMA:

19.30 - 19.45 uur: Opening en introductie van de sprekers

19.45 - 20.45 uur: Een terugblik
PROF. F. L. STUMPERS, Voormalig Philips Natuurkundig Laboratorium Eindhoven en Universiteit Nijmegen

20.45 - 21.15 uur: Pauze

21.15 - 22.15 uur: Ontwikkelingen en toekomstperspectief
PROF. E. C. VAN DER MEULEN, Katholieke Universiteit Leuven

22.15 - 23.00 uur: Discussie en gedachtenuitwisseling in de foyer

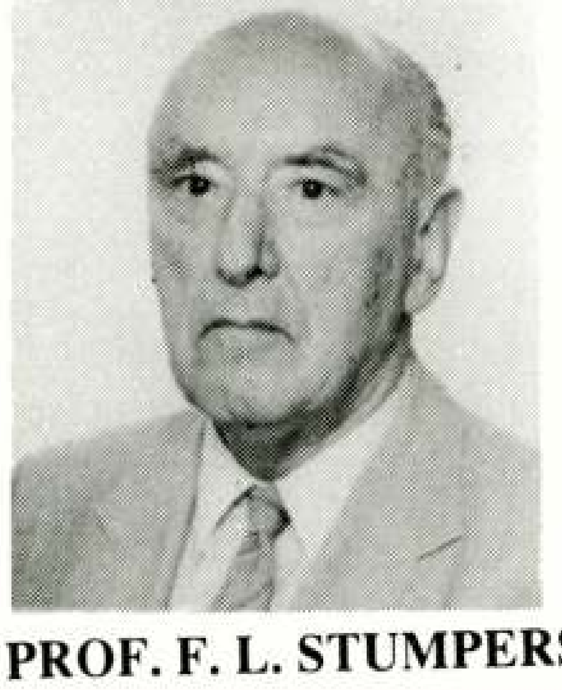
De beroemde publicaties van Shannon in 1948 hebben aanleiding gegeven tot de ontwikkeling van de informatietheorie.
De informatietheorie in de Benelux is in belangrijke mate beïnvloed door Prof. F. L. Stumpers.
Zijn activiteiten worden gekenmerkt door een grote belangstelling voor de internationale ontwikkelingen en de daarop volgende terugkoppeling naar de wetenschappers in de Benelux.
Prof. Edward van der Meulen heeft naast fundamentale wetenschappelijke bijdragen op het gebied van de meer-gebruikers-communicatie regelmatig overzichten van het vakgebied gegeven die nu reeds een zeer vruchtbare referentiebron vormen.

Aanmelding voor deze dag dient te geschieden vóór 10 februari aanstaande door middel van het insturen van onderstaande strook, gefrankeerd met een postzegel van 70 cent.

Leden van NERG, IEEE en de Werkgemeenschap voor Informatie- en Communicatietheorie en studenten hebben gratis toegang. De kosten van deelname voor niet-leden bedragen f 15,00. Betalingen dienen vóór 10 februari te zijn ontvangen op girorekening 94746 t.n.v. Penningmeester NERG, Postbus 39, 2260 AA Leidschendam.

Namens het NERG,
Ir. P. R. J. M. Smits
Tel. 070 - 3325112 (administratie NERG)

Den Haag, januari 1993.



PROF. F. L. STUMPERS

IR. M. STEFFELAAR

20 JAREN HOOFDREDACTEUR



Considerans uitgesproken door dr. M.E.J. Jeuken op de Algemene Ledenvergadering, 2 april 1993.

Ir. M. Steffelaar behaalde het diploma van natuurkundig ingenieur aan de Technische Hogeschool te Delft in juli 1949 en trad daarna in dienst bij het Natuurkundig Laboratorium van Philips als wetenschappelijk medewerker. Hij heeft daar gewerkt aan onderwerpen uit de kleurentelevisie en de radartechniek. Het is dan ook een goede gedachte van het huidige bestuur van het genootschap om bij het afscheid van ir. Steffelaar een werkvergadering te wijden aan het vakgebied waarop ir. Steffelaar vroeger werkzaam is geweest, te weten de radartechniek. De combinatie van werkvergadering en een bezoek aan het fregat Hr.Ms. De Ruyter geeft bovendien een extra dimensie aan dit afscheid.

Bij de oprichting van de TU Eindhoven in de tweede helft van de 50-er jaren zijn er nogal wat hoogleraren aangetrokken vanuit het Nat.Lab. van Philips. Dat betekende voor die hoogleraren slechts een kleine verhuizing en veelal werd die overstap gemaakt tezamen met de naaste medewerkers. Zo kwam ook ir. Steffelaar in 1960 bij de TU Eindhoven, afdeling Elektrotechniek. Hij werkte als wetenschappelijk hoofdmedewerker in de staf van de hoogleraren dr.ir. J.L.H. Jonker en dr. K.S. Knol.

Deze beide heren zagen in ir. Steffelaar een man van grote intelligentie, die op het Nat.Lab. van Philips fundamenteel onderzoek had verricht van wetenschappelijk hoog niveau. Aldus staat het in het benoemingsvoorstel van 1960.

De taken die met ir. Steffelaar overeengekomen werden waren tweeledig, t.w.

- de leiding van de elektronica-practica en
- het verrichten van wetenschappelijk onderzoek, speciaal op het gebied van de cm golven.

In de loop der jaren kwam daar nog bij de verzorging van colleges, waarbij met name genoemd dient te worden het college Inleiding in de elektriciteitsleer voor studenten van de faculteiten Werktuigbouwkunde, Bedrijfskunde en Wiskunde.

Bijna 25 jaren heeft ir. Steffelaar op de TUE gewerkt. Dat hij ook een open oog had voor niet-technische zaken moge o.a. geïllustreerd worden door het feit dat hij binnen de universiteit bestuurstaken op zich nam. Te denken valt hierbij aan het lidmaatschap van de universiteitsraad en bestuursfuncties binnen de faculteit der elektrotechniek.

Buiten de universiteit was ir. Steffelaar eveneens actief. Nu gaat het met name om het feit dat hij vanaf 1973 tot heden hoofdredacteur is geweest van het tijdschrift van het genootschap. Vanaf het begin in 1920 heeft het genootschap een tijdschrift uitgegeven. Opmerkelijk hierbij is dat slechts zes hoofdredacteuren in functie zijn geweest. De eerste hoofdredacteur, te weten H. Wesselius Oncken, heeft deze taak gedurende 30 jaren vervuld. Als goede tweede komt ir. Steffelaar naar voren. Hij heeft dit werk 20 jaren gedaan nadat hij eerst twee jaren als lid van de redactiecommissie had gefungeerd.

Steffelaar heeft in die jaren heel veel gedaan voor het tijdschrift van het NERG. Voordeel was dat hij over de nodige faciliteiten kon beschikken en dat hij door zijn functie bij de TU Eindhoven een goede toegang had tot auteurs die een bijdrage konden leveren aan het tijdschrift.

De genoemde faciliteiten waarover hij kon beschikken waren evenwel bescheiden: n.l. het kunnen beschikken over een elektrische IBM schrijfmachine met verwisselbare typekoppen en later de eerste versies van tekstverwerkingsprogramma's.

Het is binnen het genootschap een beetje traditie om de jubileumjaren te vieren met de uitgave van een speciaal nummer van het tijdschrift. Ir. Steffelaar heeft deze traditie voortgezet. Met name de viering van het 60, 65- en 70-jarig bestaan van het genootschap heeft een drietal jubileumnummers opgeleverd die er mogen zijn. De werkwijze die hierbij gevolgd werd door de hoofdredacteur en de redactiecommissie kwam hierop neer dat aan een aantal gerenommeerde leden van het genootschap gevraagd werd een overzichtsartikel te schrijven over een deel van het vakgebied waarop het genootschap zich beweegt. De drie genoemde uitgaven bevatten dan ook fraaie artikelen met deels een historische terugblik en anderzijds inschattingen van de ontwikkelingen van deelgebieden van de elektrotechniek.

De andere nummers werden meestal gevuld met artikelen die geschreven werden door de sprekers van de werkvergaderingen. Uit eigen observatie weet ik dat de scheidende hoofdredacteur hierbij zeer actief optrad. Hij was bijna altijd aanwezig op de werkvergaderingen en wist dan de sprekers te bewegen tot het schrijven van een artikel. Aldus heeft ir. Steffelaar als een soort "stille kracht" jarenlang voor de continuïteit in de uitgave van het tijdschrift gezorgd. Bovendien heeft hij kans gezien de kwaliteit van het tijdschrift constant te verbeteren.

Uit de tijd dat ik zelf voorzitter was van het genootschap herinner ik mij dat ir. Steffelaar nooit ontbrak op de bestuursvergaderingen en daar een essentiële bijdrage leverde aan de discussies. Een enkele keer ontstonden er pittige discussies tussen de hoofdredacteur en de penningmeester. De eerste wenste een goed tijdschrift met een groot aantal pagina's per jaargang te verzorgen, terwijl de andere partij de financiële belangen van het genootschap op het oog had. Uiteraard werd er altijd een verstandig compromis bereikt.

Om de waardering van het bestuur voor het werk van de hoofdredacteur tot uiting te brengen is in het jubileumnummer van 1985 enige aandacht besteed aan het feit dat ir. Steffelaar toen 12,5 jaar hoofdredacteur was. Het lijkt mij zinvol nog eens te herhalen wat het toenmalige bestuur toen o.a. heeft gesteld:

Terwijl om ons heen tijdschriften verdwijnen tengevolge van een verkeerd redactioneel en commercieel beleid en andere tijdschriften weer moeizaam opnieuw ten doop worden gehouden, vertoont het NERG-tijdschrift een verheugende continuïteit die tot uiting komt in de stijl van het tijdschrift en in het aantal pagina's dat jaarlijks verschijnt.

Het bestuur van het genootschap stelt er dan ook prijs op bij deze gelegenheid en op deze plaats de hoofdredacteur en de redactiecommissies, die sedert 1973 in functie zijn geweest, te danken voor hun onverdroten ijveren voor een zeer lezenswaardig tijdschrift.

Niet in de laatste plaats is het te danken aan de inzet van de redactiecommissie onder leiding van de heer Steffelaar dat deze woorden tot op de dag van vandaag nog volledig van toepassing zijn.

Er kan worden vastgesteld dat de gekozen stijl beantwoordt aan de doelstellingen, namelijk een tijdschrift met enerzijds een huishoudelijk accent en anderzijds, door de publikatie van de teksten van de in de werkvergaderingen gehouden voordrachten, een voor de leden aansprekend begrijpelijk niveau.

Wij dienen dan ook bij gelegenheid van zijn afscheid als hoofdredacteur ir. M. Steffelaar bijzonder dank te zeggen voor zijn inzet en het vele werk dat hij in het belang van het NERG heeft verzet.

Gezien de verdiensten is het dan ook logisch dat heden aan ir. M. Steffelaar het erelidmaatschap van het genootschap wordt aangeboden.

Wij begrijpen het besluit van ir. M. Steffelaar om in het jaar waarin hij de leeftijd van 70 jaar bereikt het hoofdredacteurschap over de dragen. Toch bekruipt ons hierbij een gevoel van weemoed en wij realiseren ons dat ook nu blijkt dat het gezegde "partir c'est mourir un peu" van alle tijden is.

Dit gevoel van weemoed wordt echter wat verzacht doordat wij hopen dat ir. M. Steffelaar nog jaren als erelid in ons midden zal mogen vertoeven.

VAN HET BESTUUR

BIJ HET AFSCHEID VAN ir. M. STEFFELAAR ALS HOOFDREDACTEUR VAN HET TIJDSCHRIFT VAN HET NERG

Het tijdschrift van het NERG kent een lange traditie. In 1920, het oprichtingsjaar van het NERG, verscheen het eerste nummer. Sinds de oprichting wordt het tijdschrift verzorgd door een hoofdredacteur, bijgestaan door een redactiecommissie.
Opmerkelijk is dat er in deze lange reeks van jaren in totaal slechts zes hoofdredacteuren zijn geweest.

Nadat ir. Steffelaar in 1971 tot de redactiecommissie was toegetreden, heeft hij vanaf 1973 de functie van hoofdredacteur vervuld. Het is daarom passend dat wij nu na het beëindigen van die ruim 20-jarige periode stilstaan bij het vele werk dat ir. M. Steffelaar daarbij voor het Genootschap heeft verricht.

Bladerend in de uitgaven van het tijdschrift ziet men dat er vanaf de 38e band een gewijzigd publicatiebeleid wordt gevoerd en dat valt samen met het aantreden van ir. Steffelaar als hoofdredacteur. Op dat moment kwam er tevens een einde aan de betrekkelijk kortdurende bundeling van publicatieactiviteiten tezamen met het Koninklijk Instituut van Ingenieurs.

In 1985, ter gelegenheid van het verschijnen van de 50e band van het tijdschrift, schrijft het bestuur:

"Terwijl om ons heen tijdschriften verdwijnen tengevolge van een verkeerd redactioneel en commercieel beleid en andere tijdschriften weer moeizaam opnieuw ten doop worden gehouden, vertoont het NERG-tijdschrift een verheugende continuïteit die tot uiting komt in de stijl van het tijdschrift en in het aantal pagina's dat jaarlijks verschijnt".

Niet in de laatste plaats is het te danken aan de inzet van de redactiecommissie onder leiding van de heer Steffelaar dat deze woorden tot op de dag van vandaag nog volledig van toepassing zijn.

Er kan worden vastgesteld dat de gekozen stijl beantwoordt aan de doelstellingen, namelijk een tijdschrift met enerzijds een huishoudelijk accent en anderzijds, door de publicatie van de teksten van de in de werkvergaderingen gehouden voordrachten, een voor de leden aansprekend begrijpelijk niveau.

Het bestuur van het Genootschap stelt er dan ook prijs op bij gelegenheid van zijn afscheid als hoofdredacteur ir. M. Steffelaar bijzonder dank te zeggen voor zijn inzet en het vele werk dat hij in het belang van het NERG heeft verzet.

Gezien de grote verdiensten voor het Genootschap is op voordracht van het bestuur op de Algemene Ledenvergadering van 2 april 1993 de heer ir. M. Steffelaar per acclamatie benoemd tot Erelid.

ir. J.B.F. Tasche,
voorzitter.

LEDENMUTATIES

Voorgestelde leden:

Dr. Ir. M. Breeuwer	Ulenpas 53	5655 JB	Eindhoven
Ing. R. van Nuland	Piet Heinlaan 93	5694 CB	Breugel
Ir. J.E.F. van Osch	Kluizemuntweg 1	9753 BH	Haren
Prof. Dr. Ramjee Prasad	Isaac da Costalaan 12	2624 ZD	Delft
Ir. A.B. Smolders	Strijland 6	5641 PT	Eindhoven
Dr. Ir. Drs. E.F. Stikvoort	S. van Noijestraat 36	5622 KH	Eindhoven
Ing. B. Stout	Tankenberg 63	2905 RE	Cap. a/d IJssel
Ir. A.T. van Zanten	Waalseweg 29	5711 BM	Someren

Nieuwe leden:

Ir. R.G.J. Arendsen	Hagenkampweg Noord 79	5616 TD	Eindhoven
Ir. P.D.C. Anker	A. van Schendelplein 185	2624 CZ	Delft
Ir. R.J.J. Bartelink	E. du Perronlaan 690	2624 NE	Delft
Ir. M.J. Bentum	D.v.v. Steenwijkstraat 26	9411 LD	Beilen
Ir. P.H.C. Bol	Granaathorst 357	2592 SZ	Den Haag
Ir. E.J. Breeuwer	van Hasseltlaan 487	2625 JE	Delft
J.J. de Bruijn	Aak 3	3891 DE	Zeewolde
Ir. S. Beukers	C. Houtmanstraat 9	3752 XE	Bunschoten
Ir. H.B. van Dijk	Uranus 39	9602 NP	Hoogezand
Ir. C.J. Grootveld	Korvezeestraat 133	2628 DG	Delft
Ir. J.A. Haantjes	Reinier de Graafweg 400	2625 DM	Delft
Ir. P.J.G. Hammer	Arienstraat 38	5931 HP	Tegelen
Prof. Ir. G.D. Khoe	Luxemburglaan 23	5625 NA	Eindhoven
Ir. F.J. Korthouwer	Westerweg 18	1704 PC	Heerhugowaard
Ir. M.K. de Lange	Kersengaarde 188	2272 NM	Voorburg
Ir. W.J. Lubbers	Asserlaan 8	1902 DS	Castricum
Ir. J.P. Meuleman	Rijswijkseweg 93	2516 HA	's-Gravenhage
Ir. Ing. S.H.A. Peters	Berkelstraat 8	5704 GE	Helmond
Prof. Dr. Ir. A.H.M. van Roermund	p/a Mekelweg 4 TU-Delft	2628 CD	Delft
Ir. M. Rubingh	Doelenstraat 62	2611 NV	Delft
Ir. G. Timmerman	Esweg 107	9411 AD	Beilen
Ir. M.H.J.B. Versteeg	Pallasstraat 202	8303 BS	Emmeloord
A. van de Vrie	Abbe de St. Pierrelaan 1	4334 AN	Middelburg
Ir. H. Vrielink	p/a Bruistensingel 242	5232 AD	Den Bosch
Ir. M.C. Vrolijk	Warmelo 43	5655 JZ	Eindhoven

Nieuwe adressen van leden:

Dr. Ir. A.M.J. van Amelsfort	Trawlerstraat 14	5237 PN	Den Bosch
Ir. R.H. Boon	Marksingel 37-B	4811 NW	Breda
Ir. J. van Bruggen	Hooiraamhoek 106	7546 MB	Enschede
Ir. J.C. Buisman	't Wuiver 32	1829 CJ	Oudorp/ Alkmaar
Dr. Ir. R.C. den Dulk	Voordesingel 1	2265 EE	Leidschendam
Ir. B.G. Hooghoudt	Postbus 82268	2508 EG	Den Haag
Ir. C.G.M. van 't Klooster	Elzenhorst 21	2215 MN	Voorhout
Ir. H. Mulder	De Sav. Lohmanplantsoen 42	2253 VR	Voorschoten
Dr. Ir. W.M.C.J. van Overveld	Paradijslaan 117	5611 KM	Eindhoven
Ir. K.H.W. Pasman	Ootmarsumbrink 6	7544 XP	Enschede
Ir. A.H. Toet	Kloosterlaan 4	1861 SE	Bergen (NH)
Ing. J.M.H. Wagemans	Vedelaarshoeve 121	7326 TL	Apeldoorn

Bij de toegezonden verzamelband voor de in 1992 verschenen tijdschriften, is door een zetfout een onjuist volgnummer vermeld.

U zult daarom een verbeterde versie ontvangen.

Ontwerpersopleidingen aan technische universiteiten: een recent kader voor samenwerking tussen bedrijven en universiteit

De tweefasenstructuur

Het universitaire onderwijs heeft de laatste tien jaar ingrijpende veranderingen ondergaan, waarvan de belangrijkste geweest is de invoering van de tweefasenstructuur. De tweefasenstructuur voorziet in een eerste fase van vier jaar en een tweede fase van wisselende duur.

Ervaringen met de eerste fase

Nu er met de eerste fase ervaring is opgedaan, blijkt, in ieder geval voor de zware technische studies, dat vier jaar in feite te kort is om studenten in deze tijd op het gewenste niveau te brengen: de gemiddelde studieduur bedraagt bijvoorbeeld voor de studierichting Elektrotechniek tussen de vijf-en-een half en zes jaar. In een recente internationale vergelijking (uitgevoerd door de commissie Waumans) van Elektrotechniek-opleidingen in verschillende landen, wordt duidelijk gemaakt dat de huidige Nederlandse opleidingen de toets der kritiek kunnen doorstaan, maar dat verlenging van de cursusduur met een half tot een heel jaar gewenst is.

De tweede fase

In de tweede fase zijn ondergebracht: vier jaar durende onderzoekersopleidingen (promotie-opleidingen) die tot de graad van doctor leiden, korte onderzoekersopleidingen, twee jaar durende ontwerpersopleidingen en, zolang de huidige WWO geldt, typische beroepsopleidingen zoals een leraren-opleiding, een aantal medische opleidingen en een wijsgerige opleiding. De typische beroepsopleidingen zijn bij wet geregeld, waardoor ook de financier duidelijk is.

De financiering van de tweede fase ontwerpersopleidingen is echter nog steeds een probleem: de overheid meent dat als het bedrijfsleven deze opleidingen graag wil, het bedrijfsleven dan mede-financier moet zijn, terwijl de Raad van Centrale Ondernemingen zich op het standpunt gesteld heeft dat onderwijs een taak van de overheid is.

Ontwerpersopleidingen

Ontwerpersopleidingen zijn twee jaar durende opleidingen die doorgaans direkt na de eerste fase gevolgd worden. Zij beogen geselecteerde jonge ingenieurs of doctorandi te confronteren met een multidisciplinaire aanpak en het werken in teamverband, gekoppeld aan verbeterd inzicht in de bedrijfsmatige aspecten van het ontwerpproces. Ontwerpersopleidingen zijn tot stand gekomen in het kader van landelijke taakafspraken, zodat niet iedere opleiding overal gevolgd kan worden. De programma's (ruwweg een jaar cursorische verbreding en verdieping, een jaar opdracht) worden door een landelijke commissie waarin personen uit de universitaire wereld en uit het bedrijfsleven zitting hebben, beoordeeld. Belangrijke aspecten zijn: multidisciplinariteit en verbreding met bedrijfsmatige kennis. Bij een positief oordeel is de opleiding gecertificeerd. Voorlopige certificatie vindt plaats op grond van de ingediende voorstellen, definitieve certificatie op grond van een onderzoek naar de daadwerkelijk gevolgde programma's en uitgevoerde ontwerpopdrachten. Certificatie houdt in dat de opleiding erkend is en dat afgestudeerden van een dergelijke opleiding ook in een centraal register geregistreerd worden. Afgestudeerden hebben zich doorgaans een prima positie in het bedrijfsleven verworven, mede dankzij de strenge toegangsselectie bij de ontwerpersopleidingen.

Bij de begeleiding van de ontwerp-opdracht zijn bij voorkeur ook mensen uit het bedrijfsleven betrokken. Toch gebeurt dit niet in alle gevallen.

Samenwerkingsmogelijkheden

Hoewel research-contracten tussen bedrijven en universiteiten geen ongewoon verschijnsel zijn, komt samenwerking bij ontwerp-opdrachten minder vaak voor dan zou kunnen. Samenwerking bij de ontwerp-opdracht biedt een aantal voordelen: het is een niet al te lange en een niet al te korte periode, alleen de betere studenten worden tot de opleidingen toegelaten, er worden geen langlopende personele verplichtingen aangegaan, terwijl toch gedurende een jaar gezien kan worden hoe er gewerkt wordt op een terrein dat ook voor een onderneming van belang is. Bovendien heeft men de beschikking over de deskundigheid binnen de universiteit.

Samenwerking tussen de technische universiteiten en grote en kleinere bedrijven, vindt thans veelal plaats op grond van persoonlijke contacten tussen bijvoorbeeld hoogleraren en personen uit het bedrijfsleven. Dat is prima. Een meer gestructureerde vorm van samenwerking kan zijn dat bedrijven en universiteit een intentie-verklaring afsluiten ten aanzien van samenwerking via het project-jaar in een ontwerpersopleiding, waarbij bedrijven het voor studenten aantrekkelijk maken een ontwerpersopleiding te beginnen en af te ronden, en waarbij de universiteit bedrijven informeert over de momentane mogelijkheden voor samenwerking (aanwezigheid en interesse van ontwerpers die aan hun projectjaar toe zijn). In concrete gevallen kan dan een samenwerkingscontract afgesloten worden, waarin rechten en plichten van beide partijen nader gespecificeerd worden.

Het belang van ontwerpersopleidingen is onomstreden: multidisciplinariteit, werken in teamverband, kostenbesef en batenbenul, projectmanagement en -financiering, enthousiasme en frisse ideeën zijn voor innovatieve ondernemingen van groot belang. Wellicht is de beperkte samenwerking die zich thans op het gebied van de ontwerpersopleidingen voordoet, een gevolg van de relatieve onbekendheid van het fenomeen, dat nog niet zo lang bestaat.

Gebieden van ontwerpersopleidingen

De drie technische universiteiten verzorgen in totaal ruim 30 ontwerpersopleidingen. Op het gebied gerelateerd aan Elektrotechniek bijvoorbeeld zijn er de volgende opleidingen: Informatietechnische Componenten (UT), Materiaalkunde en Materiaaltechnologie (UT-TUD), Tele-informatica en Open Systemen (UT), Mechatronisch Ontwerpen (UT-TUE,TUD), Microelectronics (TUD), Information Technology (TUD), Informatie- en Communicatietechniek (TUE), Computerondersteund Ontwerpen en Fabriceren van Discrete Producten (TUE). Sommige opleidingen worden door de drie TU's gezamenlijk verzorgd, zoals Computational Mechanics.

Voor meer informatie over ontwerpersopleidingen en andere vervolgopleidingen kunt u terecht bij:

dr. K. Klosse	Centre of Advanced Education	Universiteit Twente	Postbus 217 - 7500 AE	Enschede	tel.: 053-898020
prof.dr. S.T.M. Ackermans	Instituut Vervolgopleidingen	TU Eindhoven	Postbus 513 - 5600 MB	Eindhoven	tel.: 040-472452
mw. drs. C.M. Gulden	Top-Tech Studies	TU Delft	Postbus 5048 - 2600 GA	Delft	tel.: 015-788019

Antoine G. Roederer & Kari J. Markus
XEA - ESTEC, PB 299
NL-2200 AG Noordwijk
The Netherlands

Phone: +31-1719-8-3935/4832
Fax: +31-1719-8-4999

Noordwijk, 16 April, 1993

16th ESA WORKSHOP ON DUAL POLARISATION ANTENNAS
ESTEC, NOORDWIJK, THE NETHERLANDS
8-9 JUNE 1993

Dear colleague,

We are pleased to invite you to the 16th ESA Workshop on dual polarisation antennas, organised in association with IEE (UK/Benelux), IEEE (USA/Benelux), ITG (Germany), NERG (Netherlands) and SEE (France).

The objective of this Workshop is to identify new ideas and direction for R & D on dual polarised array and reflector antenna technologies for both the space and ground segments.

There will be 10 papers on arrays (dual polarisation antennas for future SAR:s, dual polarised microstrip antennas, active and passive arrays, etc), 4 papers on reflectors (dual gridded reflectors, reflector shaping, etc.), 4 papers on feeds and polarisation control (compact radiators, frequency selective surfaces, etc.) and 7 short talks. We have also invited papers from the USA (W. Imbriale, JPL Pasadena) and from Japan (Y. Mizuguchi, R&D Laboratories KDD) presenting recent dual polarisation antenna developments in the USA and Japan respectively. If you wish to receive the detailed program and the registration material, please use the fax form overleaf.

The Workshop will take place at ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, in room Newton 1 + 2 on Tuesday 8 and Wednesday 9 June, 1993. The language of the workshop will be english.

The registration fee is Fl. 250 per participant and covers the proceedings, two lunches at ESTEC, the dinner on June 8th and the local transport by bus.

From Amsterdam airport, Noordwijk can be reached by taxi (#Fl. 100) or by train + taxi, via Leiden. If you come by car, use the A44 motorway and a Noordwijk exit, then follow ESTEC signs.

We are very much looking forward to seeing you in Noordwijk.

Yours sincerely,

Antoine G. Roederer

Kari J. Markus

ANSWER TELEFAX FORM

TO: ESTEC Conference Bureau
Mail-code ZRR
Keplerlaan 1
NL-2200 AG Noordwijk
The Netherlands

FAX: +31-1719-85658

FROM:

INSTITUTION:

ADDRESS:

FAX:

16th ESA WORKSHOP ON DUAL POLARISATION ANTENNAS
ESTEC, NOORDWIJK, THE NETHERLANDS
8-9 JUNE 1993

Please send me the detailed program, registration and hotel reservation forms for the Workshop.

Conferentie-aankondigingen

PATO

- Mechatronisch ontwerpen, 7, 8, 14, 15, 21 en 22 juni 1993; Universiteit Twente.
- Satellietcommunicatie, 10, 11, 17, 18, 24 en 25 juni 1993 in Eindhoven.
- Radio navigatiesystemen, 1 en 2 juli 1993 in Delft.

Contactadres: Stichting PATO, Prinsessegracht 23, Postbus 30424, 2500 GK Den Haag. Tel.: 070-3644957 / Fax: 070-3562722.

ECOC '93 19th European Conference on Optical Communication;
12-16 september 1993; Montreux, Switzerland.
Contactadres: Swiss Federal Institute of Technology.
Prof. dr. Hans Melchior, TPC-Chairman.
CH-8093 Zurich, Switzerland.
Tel.: +41 1 377 2102 / Fax: +41 1 392 0974.

CEI-Europe/Elsevier

- Advanced Technology Short Courses on Communications, Signalling & Networks.
  7 - 17 juni 1993, U.K.
  18 - 21 oktober 1993, Spanje.
  31 januari - 3 februari 1994, Duitsland.
- Advanced Technology Short Courses on Signal Processing & Recognition Technologies.
  7 - 11 juni 1993, U.K.
  15 - 17 november 1993, U.K.
  31 januari - 9 februari 1994, Duitsland.
- High-speed Communication Networking.
  27 september - 1 oktober 1993, U.K.
- Adaptive Signal Processing.
  27 september - 1 oktober 1993, U.K.
- Personal Communication Networks.
  27 september - 1 oktober 1993, U.K.
- Maintaining Signal Quality in High-Speed Digital Systems.
  27 september - 1 oktober 1993, U.K.
- Fiber Optic Communication Technology, Systems and Networks.
  27 september - 1 oktober 1993, U.K.
- Modern Digital Modulation Techniques.
  18 - 22 oktober 1993, Spanje.
- Modern Digital Communications.
  15 - 19 november 1993, U.K.
- Simulation of Communication Systems.
  18 - 21 oktober 1993, Spanje.
- Broadband Networks.
  18 - 22 oktober 1993, Spanje.
- High Speed Data Communication.
  18 - 21 oktober 1993, Spanje.
- Low Earth Orbit Satellite Systems.
  21 - 22 oktober 1993, Spanje.

Contactadres: Mrs. Tina Persson, marketing manager, CEI-Europe, P.O. Box 910, S-612 25 FINSPONG; Sweden.
Tel.: +46 122 17570 / Fax: +46 122 14347.

Tijdschrift van het Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap

Inhoud

deel 58 – nr. 2 – 1993

Druk: de Witte, Eindhoven.